



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA CUASI-
ÓPTICO PARA MEDIDA DE MUESTRAS EN EL RANGO DE
LOS TERAHERCIOS

Itziar Maestrojuán Biurrun
Ramón Gonzalo García
Pamplona, 7 Mayo 2010





UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
E.T.S.I.I. y Telecomunicación
Campus Arrosadía, s/n
31006 Pamplona Navarra-Spain
Tfno.:34-48-169000 Fax: 34-48-169169

Acta de Proyecto Final de Carrera

Título:

Alumno:

Director del Proyecto:

Reunido el tribunal, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente

Secretario

Vocal 1

Fdo.:.....

Fdo.:.....

Fdo.:.....

Vocal 2

Vocal 3

Fdo.:.....

Fdo.:.....

acuerda otorgar la calificación de

Pamplona,

de

de 2010





Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mi tutor Ramón Gonzalo toda la ayuda prestada. En segundo lugar, a Íñigo Ederra por su colaboración en muchos momentos. Y por último a mi familia por haberme apoyado estos cinco duros años.

También me gustaría dedicar este proyecto a mi abuela María por haber creído en mí.

Muchas gracias.

Pamplona, 7 Mayo 2010

Itziar Maestrojuán Biurrun





0-RESUMEN	9
1-INTRODUCCIÓN	11
2-INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS CUASI-ÓPTICOS	13
2.1-¿QUÉ ES LA CUASI-ÓPTICA?	13
2.2-POR QUÉ LA CUASI-ÓPTICA ES DE INTERÉS	14
3-PROPAGACIÓN DEL RAYO GAUSSIANO	17
3.1-DERIVACIÓN DE LA PROPAGACIÓN BÁSICA DE RAYOS GAUSSIANA	17
3.1.1-Ecuación de onda paraxial.....	17
-Solución fundamental de los modos de los haces Gaussianos en coordenadas cilíndricas	19
-Modo fundamental del haz Gaussiano en coordenadas rectangulares: una dimensión.....	24
- Modo fundamental del haz Gaussiano en coordenadas rectangulares: dos dimensiones.....	24
4-TRANSFORMACIÓN DEL HAZ GAUSSIANO.....	29
4.1-INTRODUCCIÓN	29
4.2-MATRICES DE RAYOS Y PARÁMETRO COMPLEJO DEL HAZ	30
4.3-TRANSFORMACIÓN DEL HAZ GAUSSIANO CON ELEMENTOS ENFOCADORES.....	36
4.4-TRANSFORMACIÓN POR UN SISTEMA CUASI-ÓPTICO	37
5-ÓPTICA GEOMÉTRICA	39
5.1-INTRODUCCIÓN	39
5.2-POSTULADOS DE LA ÓPTICA GEOMÉTRICA	39
5.2.1-POSTULADOS DE LA ÓPTICA GEOMÉTRICA.	39
5.2.2-PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN UN MEDIO HOMOGÉNEO	40
5.2.3-REFLEXIÓN DE LA LUZ EN UN ESPEJO	40
5.2.4-REFRACCIÓN DE LA LUZ EN UNA SUPERFICIE	41
5.2.5-ESPEJOS PLANOS.....	42
5.2.6-ESPEJOS PARABÓLICOS.....	42
5.2.7-ESPEJOS ELÍPTICOS	43
5.2.8-ESPEJOS ESFÉRICOS	43
5.3-FORMULACIÓN MATRICIAL DE LA ÓPTICA GEOMÉTRICA.....	44
5.3.1-PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE	45
5.3.2-REFRACCIÓN EN UNA SUPERFICIE PLANA	46
5.3.3-REFRACCIÓN EN UNA SUPERFICIE ESFÉRICA	46
5.3.4-REFLEXIÓN DE UN ESPEJO ESFERICO	47
5.3.5-REFLEXIÓN EN UN ESPEJO PLANO	48
5.3.6-TRANSMISIÓN A TRAVÉS DE UNA LENTE DELGADA	48
5.3.7-MATRIZ DE UNA SUCESIÓN DE COMPONENTES ÓPTICOS.....	49
6-DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDIDA	51
6.1-DISEÑO INICIAL	51
6.1.1-GEOMETRÍA DE LA ELIPSE.....	52
6.1.2-DISEÑO DOS ESPEJOS ELÍPTICOS.....	62
6.2-DISEÑO CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS	63
6.3-DISEÑO CUATRO ESPEJOS: DOS ELÍPTICOS Y DOS PARABÓLICOS	66
6.4-DISEÑO FINAL EN 3 DIMENSIONES	70
7-RESULTADOS ANTENA IDEAL	73



7.1-ANTENA GAUSSIANA EN EL PUNTO DE MEDIDA	73
7.1.1- DISEÑO INICIAL: DOS ESPEJOS ELÍPTICOS	73
7.1.2- DISEÑO CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS	86
7.1.3- DISEÑO CUATRO ESPEJOS: 2 ELÍPTICOS Y 2 PARABÓLICOS.....	100
7.2-ANTENA GAUSSIANA A LA SALIDA.....	114
7.2.1-DISEÑO INICIAL: DOS ESPEJOS ELÍPTICOS.....	114
7.2.2-DISEÑO CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS.....	120
7.2.3-DISEÑO CUATRO ESPEJOS: DOS ELÍPTICOS Y DOS PARABÓLICOS.....	126
8-RESULTADOS ANTENA REAL.....	133
8.1-DISEÑO ANTENA REAL EN EL PUNTO DE MEDIDA	133
8.1.1-DISEÑO INICIAL: DOS ESPEJOS ELÍPTICOS	133
8.1.2-DISEÑO CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS.....	141
8.1.3-DISEÑO CUATRO ESPEJOS: DOS ELÍPTICOS Y DOS PARABÓLICOS.....	148
8.2-ANTENA REAL A LA SALIDA	154
8.2.1-DISEÑO INICIAL: DOS ESPEJOS ELÍPTICOS.....	154
8.2.2-DISEÑO CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS.....	160
8.2.3-DISEÑO CUATRO ESPEJOS: DOS ELÍPTICOS Y DOS PARABÓLICOS.....	166
8.3-CONCLUSIONES FINALES.....	171
9-MONTAJE DEL DISEÑO	173
9.1-COMPONENTES.....	173
9.2-MONTAJE FIJO.....	187
9.3-MONTAJE COMPLETO	188
9.4-MONTAJE DISEÑO 1: CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS	189
9.5-MONTAJE DISEÑO 2: DOS ESPEJOS ELÍPTICOS Y DOS PARABÓLICOS.....	190
10- CONCLUSIONES.....	191
11-LÍNEAS FUTURAS.....	193
12-BIBLIOGRAFÍA	195



0-RESUMEN

El presente Proyecto Final de Carrera trata de describir el diseño y caracterización de un sistema de medición en el rango de los terahercios por medio de sistemas cuasi-ópticos.

Dicho proyecto va a cubrir una serie de necesidades existentes a la hora de analizar distintos materiales utilizando un analizador de redes.

El problema principal que se tenía antes de la realización de este proyecto era que a la hora de medir muestras lo importante era medir los parámetros que caracterizaban dichas muestras. Estos parámetros iban desde el coeficiente de refracción, la permitividad de un material o incluso su permeabilidad. Dichos datos se calculaban a través de los parámetros S, y los parámetros S a partir de medidas en radiación. Al medir en radiación el campo que se radiaba se difractaba con lo que hacía imposible medir secciones pequeñas de los objetos, es decir, eran necesarios objetos muy grandes para que casi la totalidad del campo incidiera sobre ellos. Por tanto, era necesario centrar este campo, para obtener más campo en la muestra y con ello conseguir tener la zona de medida controlada y aumentar el Margen Dinámico de medida.

El problema surge ahora en cómo hacer esto en Terahercios y es por ello por lo que se ha elegido la cuasi-óptica, ya que trabaja similar a la óptica geométrica pero en frecuencias mucho más bajas (THz). Para realizar esto se han utilizado espejos con el fin de enfocar el haz sobre la muestra.

En este proyecto se han diseñado dos sistemas complementarios. El primero de ellos pretendía medir pequeñas secciones de muestras y para ello se han utilizado espejos elípticos. El segundo caso se centraba en medir espacios más amplios de dichas muestras y para ello ha utilizado espejos tanto elípticos como parabólicos.

En ambos diseños los resultados obtenidos son buenos ya que tanto para el diseño empleado para medir zonas reducidas de muestras como para el diseño destinado a medir zonas más amplias, los valores obtenidos para el ancho de haz en el punto de medida son del orden requerido, como se verá a lo largo del proyecto.

Además de ello, los valores obtenidos de potencia que llega a cada espejo y al final del sistema indicado son altos, por lo que los diseños no tienen apenas pérdidas y los resultados de medida serán bastante exactos.

Todos estos resultados y diseños se analizarán a lo largo de este proyecto de forma más exhaustiva.



1-INTRODUCCIÓN

El diseño del sistema cuasi-óptico del que trata este proyecto es un diseño elaborado dentro del Grupo de Investigación de Antenas de la Universidad Pública de Navarra. Dicho sistema ha sido diseñado para la posterior utilización en posibles investigaciones referentes a este grupo.

El motivo de la realización de este proyecto es que al tener un material y querer medirlo, se miden sus parámetros más importantes como el índice de refracción o la permitividad del material. Estos valores se calculan a partir de los parámetros S , los cuales se miden en radiación. Dado que si se midiera en radiación directamente el haz se difractaría e implicaría que para poder medir adecuadamente el objeto de medida debiera ser muy grande y además el Margen Dinámico sería muy bajo. Dado que esto no es lo que interesa se pretende con este proyecto buscar una solución que permita medir secciones de los objetos de interés muy pequeñas.

El objetivo principal de este proyecto es diseñar un sistema que permita medir reducidas secciones de diferentes muestras a frecuencias muy altas. Para ello es necesaria la utilización de la cuasi-óptica ya que simplemente con la óptica geométrica no se podría trabajar a frecuencias tan bajas. No sólo se va a centrar en este diseño el presente proyecto sino que se va a diseñar además otro sistema complementario con el que se puedan medir secciones más grandes.

Se van a analizar distintos parámetros para cada uno de los dos diseños con el objetivo de ver si los resultados obtenidos son buenos. Algunos de estos parámetros a analizar serán la potencia, las pérdidas obtenidas, el ancho del haz en varios puntos del diseño o algún corte de dicho haz que nos muestre el recorrido de la energía y su forma. Dependiendo de los valores que se deseen para estos parámetros se pensará en un tipo de diseño u otro.

Para el diseño en el que el valor del ancho del haz, $\omega_{0\ out}$, debe ser pequeño se utilizarán espejos elípticos ya que estos tienen la característica de que son capaces de enfocar. Para el caso en el que la zona de medida interesa que sea más grande se utilizarán espejos parabólicos además de elípticos, ya que los parabólicos tienen la propiedad de reflejar los rayos todos paralelos y con un $\omega_{0\ out}$ de mayor valor.

Este proyecto va a constar en primer lugar de una pequeña introducción acerca de lo que es la cuasi-óptica, ya que su papel es fundamental en este proyecto debido a que gracias a ella se pueden conseguir los objetivos que se buscan.

Posteriormente se va a analizar cómo se realiza la propagación de un rayo Gaussiano seguido de cómo se lleva a cabo la transformación de dicho rayo Gaussiano.

A continuación, se va a realizar una pequeña explicación de lo que es la óptica geométrica ya que cuando se habla de cuasi-óptica ésta se relaciona con la óptica geométrica ya que ambas usan espejos y lentes en su funcionamiento.



Una vez explicados los conceptos teóricos de este proyecto se pasará a la parte de Diseño del sistema de medida. En esta parte se van a diseñar los dos sistemas de los que se ha hablado gracias a un software llamado GRASP. Se obtendrán valores del tamaño de los espejos, distancias entre ellos, frecuencia de trabajo, etc.

Una vez realizado el diseño se analizarán los resultados obtenidos en un apartado que lleva el mismo nombre. En dicho apartado se utilizarán como alimentadores dos tipos de antenas, una Gaussiana y otra real definida con parámetros reales de radiación. Se calcularán las características del sistema cuasi-óptico tanto en el punto de medida donde se colocarán las futuras muestras como al final del sistema. Se calcularán valores de potencia en cada uno de los espejos, spill-over, tamaño de $\omega_{0\ out}$, etc. Todo esto se analizará de nuevo utilizando el software GRASP.

Por último, este proyecto constará de un apartado en el que se analizará el montaje necesario para la construcción de los dos diseños en los que se ha trabajado. En dicho apartado se analizarán cada uno de los objetos necesarios para su construcción así como el soporte en el que irán colocados ambos diseños.

Para terminar la redacción de dicho proyecto se añadirá una parte final con las conclusiones obtenidas además de la bibliografía utilizada.



2-INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS CUASI-ÓPTICOS

2.1-¿QUÉ ES LA CUASI-ÓPTICA?

La cuasi-óptica trata de la propagación de un haz de radiación que está razonablemente bien colimado. Es decir, trata de una radiación, cuyos rayos son paralelos entre sí, pero tiene dimensiones pequeñas cuando es medido en longitudes de onda en el eje de propagación transversal.

Al principio esto puede resultar algo restrictivo e inverosímil pero actualmente cubre un gran número de situaciones de gran importancia en el diseño de sistemas que trabajan en longitudes de onda desde las microondas hasta las submilimétricas.

Muchos científicos e ingenieros están familiarizados con la óptica geométrica. Ésta trata de la radiación en el límite en el que la longitud de onda tiende a cero ($\lambda \rightarrow 0$). Aunque este tema se explicará más adelante, se va a realizar una breve introducción. Empezando con las reglas básicas de la propagación de un rayo o representando perfectamente un haz directivo, la óptica geométrica incluye rigurosos y completos métodos para analizar sistemas ópticos que comparten características comunes. En dichos sistemas las dimensiones de todos los componentes (por ejemplo, lentes, espejos, aperturas) son suficientemente grandes como para despreciar los efectos de las longitudes de onda finitas.

La radiación tiende a difractarse cuando se emite desde una fuente que es relativamente pequeña en relación con la longitud de onda. Esta difracción tiene como objetivo cambiar su distribución conforme la distancia a la fuente varía.

En un límite diferente del de la óptica geométrica, que es, λ aproximadamente igual a las dimensiones del sistema, los efectos de la difracción dominan la propagación de la radiación. En esta situación, que incluye el campo cercano en la apertura de la antena, se necesita un estudio completo para analizar el comportamiento del haz, y además los cálculos exactos para sistemas reales requieren mucho tiempo.

La cuasi-óptica abarca un grupo intermedio entre estos dos casos y de este modo incluye la importante y realista situación de un haz de radiación cuyo diámetro solo es moderadamente grande cuando se mide en longitudes de onda. Esto permite emplear la elegante teoría de Modos de Haz Gaussiana y de Propagación de Rayos Gaussiana.

Este estudio incluye los efectos de difracción dentro de límites razonables y generalmente no muy restrictivos. La eficacia del análisis Gaussiano de Rayos aumenta por la considerable variedad de bocinas alimentadas por ondas de microondas y milimétricas que radian rayos que tienen una forma casi Gaussiana. Así, la radiación de tales aparatos puede ser representada tal cual viene de la anchura del haz Gaussiano. La acción de enfocar aparatos tales como lentes, es también relativamente sencilla de calcular usando la teoría de rayos Gaussianos.

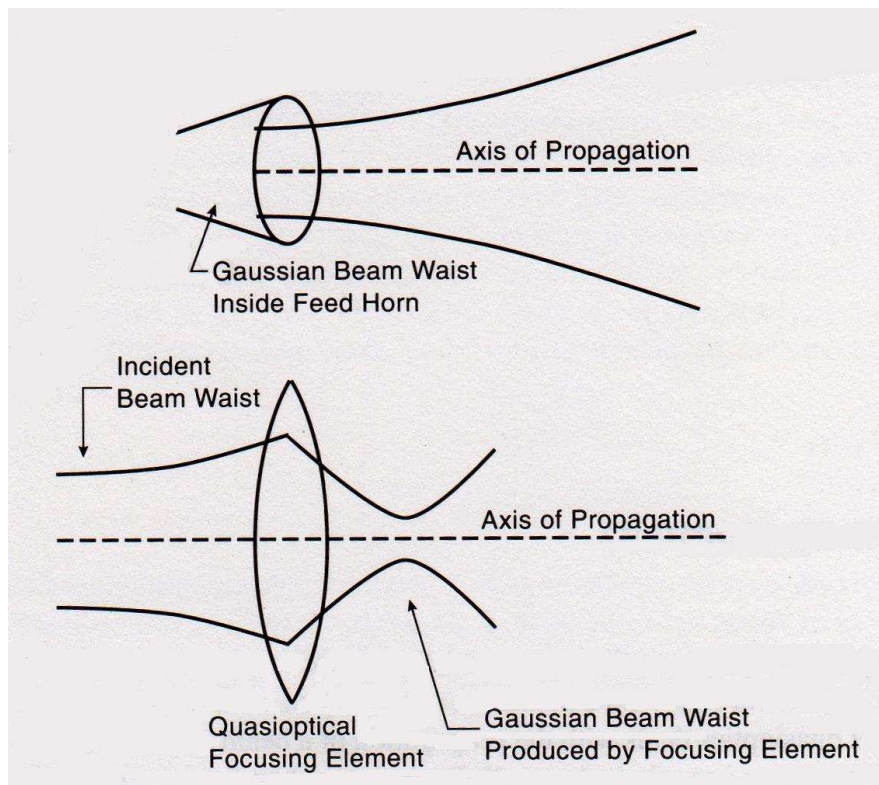


Figura 2.1 Imagen superior: Haz Gaussiano producido por una antena de bocina. Imagen inferior: Transformación del haz Gaussiano mediante un elemento de enfoque cuasi-óptico

2.2-POR QUÉ LA CUASI-ÓPTICA ES DE INTERÉS

Para cada porción del espectro electromagnético, varios medios de propagación que están bien encajados a la longitud de onda han evolucionado, aunque de ninguna manera hay una única correspondencia. A frecuencias de radio y microondas, por ejemplo, sistemas de un solo modo, son casi universalmente empleados.

Los medios preferidos de propagación van desde cables coaxiales con dimensiones laterales mucho más pequeñas de una longitud de onda a frecuencias bajas soportando distribuciones de campo eléctricas y magnéticas, hasta guías de onda con dimensiones en el orden de longitudes de onda a altas frecuencias. Este amplio uso de métodos de propagación, junto con otros microstrip, stripline y stotline (para dar solo una sección), comparten la característica de ser usados como medio de transmisión de un solo modo. Así solo puede ser soportada una única configuración del campo eléctrico y magnético a una frecuencia dada.

Tales sistemas emplean conductores metálicos y/o dieléctricos para obtener la configuración deseada del campo, pero ambos tipos de materiales traen como consecuencia pérdidas que aumentan a altas frecuencias. La potencia perdida por unidad de longitud para materiales dieléctricos generalmente aumenta a un ritmo por lo menos tan rápido como proporcional a la frecuencia; pero una pérdida proporcional al cuadrado de la frecuencia se encuentra en el rango de las milimétricas a las submilimétricas ([SIM84], [BIR94]). Incluso un material de bajas



pérdidas como el polietileno tiene un coeficiente de absorción de 0.65 dB/cm a una frecuencia de 500 GHz. Las pérdidas de una guía onda rectangular fabricada con un material de conductividad fija aumentan con la frecuencia [BEN69]. Resistividades superficiales medidas en la práctica en la región de las submilimétricas son varias veces mayores que lo esperado de valores DC de conductividad, que pueden resultar en pérdidas de guía onda considerablemente excesivas de lo que se esperaba teóricamente.

Por tanto, es verdad que las dimensiones físicas de los circuitos distribuidos escalados con longitud de onda (de manera opuesta a la frecuencia) e incluso los aparatos, se hacen más pequeños a altas frecuencias. Cuanto más rápido aumentan en metales y dieléctricos las pérdidas significa que las pérdidas de dichos sistemas de transmisión de un solo modo se convierten en excesivas para sistemas generales usados en milimétricas y más cortas longitudes de onda (aunque los componentes pueden ser todavía construidos usando estos medios).

Por otro lado, se debería considerar tomar ventaja esencialmente de la naturaleza de la pérdida por propagación de radiación electromagnética en espacio libre. Sin embargo, primero se nota que debido a la restricción mencionada anteriormente en la que el tamaño de todas las aperturas y componentes debe ser mucho mayor que λ , cualquier sistema que satisfaga la condición de ser “puramente óptico” sería irrealizable por el gran tamaño para estas grandes longitudes de onda. Debido a que cualquier haz de radiación aumenta su dimensión lateral D una cantidad comparable a su valor inicial en una distancia del orden de $\frac{D^2}{\lambda}$, un haz que tiene inicialmente un tamaño transversal de unos pocos centímetros y una longitud de onda de aproximadamente 1 cm se expandirá, en una distancia de unas pocas décimas de centímetros, para ser de un tamaño virtualmente inmanejable. De este modo, se enfrenta con haces de radiación colimados que no son grandes en sus dimensiones transversales medidas en longitud de onda y consecuentemente divergen y tienen que ser reenfocados para hacer un sistema completo.

La naturaleza de este reenfocamiento, teniendo lugar en el campo cercano del rayo colimado, significa que el uso de la óptica geométrica resultará en serios errores. Consecuentemente, si se desea tomar ventaja de la potencia perdida de propagación en el espacio libre, es necesario tratar con la difracción que inevitablemente acompaña al diámetro relativamente pequeño del haz dictado por consideraciones prácticas.

La propagación cuasi-óptica usando haces Gaussianos ofrece una solución para este problema. Además de reducir el problema en la exactitud calculando el comportamiento de la radiación en tales sistemas, tiene un número considerable de otras ventajas que lo hacen un medio de transmisión particularmente atractivo.

Una de estas ventajas es que prescinde de líneas de transmisión metálicas o dieléctricas, por lo que la interacción con materiales que producen pérdidas es virtualmente eliminada. Como se debería ver, la propagación cuasi-óptica requiere enfocar el haz de propagación, pero las lentes o espejos usados están relativamente bien separados unos de otros, y la pérdida por



unidad de longitud por la que el rayo viaja es drásticamente reducida. Como ejemplo de ello se tiene que la atenuación teórica del modo TE₁₀ en la guía de onda rectangular WR-4 a 250 GHz es aproximadamente 12 dB/m. Esto puede ser comparado a la pérdida medida por Lynch [LYN88] en un sistema cuasi-óptico de guía onda de haz Gaussiano incorporado a esta frecuencia, que usaba una serie de lentes de teflón, con 1.5 dB/m. Además de una baja pérdida extraordinaria, los sistemas cuasi-ópticos pueden manejar múltiples polarizaciones y pueden operar por encima de grandes anchos de banda. Ambas características surgen de la ausencia de condiciones de contorno que introducen dispersión en guías de onda, mientras que los sistemas cuasi-ópticos pueden distribuir potencia por una región de un tamaño de al menos varias longitudes de onda, los sistemas de transmisión de un solo modo están restringidos a dimensiones de lentes menores o iguales a la longitud de onda.

En sistemas cuasi-ópticos, la ausencia de dieléctricos y conductores metálicos de ruptura, da como consecuencia la posibilidad de un aumento significativo en la capacidad de manejo de potencia. Además, se tiene la posibilidad de usar muchos aparatos que puedan compartir la potencia con la que son manejados y que pueden también disipar potencia más efectivamente, como resultado del gran espacio disponible.

Los sistemas cuasi-ópticos pueden tener considerables capacidades de toma de imágenes, dando como resultado que un único set de lentes, espejos, y otros componentes pueden operar en diferentes haces mientras conservan sus características independientes. Esta capacidad es, por supuesto, similar a la de los sistemas ópticos geométricos, y es una característica que está totalmente ausente en un sistema de transmisión de un solo modo. La capacidad de toma de imágenes de los sistemas cuasi-ópticos es en general más restrictiva que en los sistemas óptico geométricos, pero el tema relativamente nuevo de las imágenes cuasi-ópticas promete mayores mejoras del atractivo de este medio de propagación.



3-PROPAGACIÓN DEL RAYO GAUSSIANO

Los rayos Gaussianos juegan un papel tan importante en láseres ópticos como en sistemas de longitudes de onda grandes, que han sido analizados extensamente, empezando con algunos de los métodos clásicos mencionados antes.

Casi cualquier texto de sistemas ópticos habla de la propagación de los rayos Gaussianos en algún punto, y están disponibles varios artículos bastante exhaustivos sobre el tema en la web o en distintas bibliotecas alrededor del mundo. Sin embargo, para sistemas de longitudes de onda en las milimétricas y submilimétricas hay ciertos aspectos que merecen una especial atención. Se enfatizan aspectos de la propagación cuasi-óptica que se ha probado que son de gran importancia a estas longitudes.

A continuación se va a dar una derivación de las fórmulas del rayo Gaussiano basadas en la ecuación de onda paraxial, en coordenadas cilíndricas y rectangulares. Se hablará también de normalización e interpretación de las fórmulas de propagación Gaussiana de rayos.

3.1-DERIVACIÓN DE LA PROPAGACIÓN BÁSICA DE RAYOS GAUSSIANA

3.1.1-Ecuación de onda paraxial

Solo en casos muy especiales la propagación de una onda electromagnética resulta en una distribución de amplitudes de campo que es independiente de la posición: el ejemplo más familiar es una onda plana.

Si se limita la región sobre la que hay inicialmente en el campo no cero, la propagación de la onda se convierte en un problema de difracción. Que en su forma más general es un vector complejo. Se trata aquí el problema simplificado encontrado cuando un haz de radiación está en gran parte colimado: esto es, tiene una dirección de propagación bien definida pero tiene también algunas variaciones transversales (distintas en un plano de onda). Por lo tanto se desarrolla la ecuación de onda paraxial, que crea las bases para la propagación de haces Gaussianos. Así, un rayo Gaussiano ha limitado su variación trasversal comparada con una onda plana. Esto es diferente a un rayo originado de una fuente óptica geométrica en la que se origina de una extensión finita, distinta de una fuente de punto infinitesimal.

La componente individual, ψ , de una propagación de onda electromagnética en un medio uniforme satisface la ecuación de onda de Helmholtz

$$(\nabla^2 + k^2)\psi = 0, \quad (3.1)$$

donde ψ representa cualquier componente de E o H. Se ha asumido una variación de tiempo a una frecuencia angular ω de la forma $\exp(j\omega t)$. El número de onda k es igual a $2\pi/\lambda$, así que



$k = \frac{\omega(\epsilon_r \mu_r)^{0.5}}{c}$, donde ϵ_r y μ_r son la permitividad y la permeabilidad relativa del medio, respectivamente.

Para una onda plana, las amplitudes de campo eléctrico y magnético son constantes; y sus direcciones son perpendiculares mutuamente, y perpendiculares al vector de propagación. Para un haz de radiación que es similar a una onda plana pero para la cual se permitirá algunas variaciones perpendiculares a los ejes de propagación, se puede asumir todavía que los campos eléctrico y magnético son (perpendiculares mutuamente) perpendiculares a la dirección de propagación. Permitiendo que la dirección de propagación esté en la dirección positiva de z , se puede escribir la distribución para cualquier componente del campo eléctrico como:

$$E(x, y, z) = u(x, y, z) \exp(-jkz), \quad (3.2)$$

donde u es una función escalar compleja que define la parte de la onda no plana del rayo. En coordenadas rectangulares, la ecuación de Helmholtz es:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k^2 E = 0. \quad (3.3)$$

Si se sustituye la solución de onda cuasi-plana, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - 2jk \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad (3.4)$$

que se suele llamar ecuación reducida de ondas.

La aproximación paraxial consiste en asumir que la variación a lo largo de la dirección de propagación de la amplitud u (debido a la difracción) será menor en una distancia comparable a la longitud de onda, y que la variación axial será menor comparada con la variación perpendicular en esta dirección.

La primera afirmación implica que (en magnitud) $[\Delta(\partial u / \partial z) / \Delta z] \lambda \ll \partial u / \partial z$. Esto permite concluir que el tercer término en la ecuación 3.4 es pequeño comparado al cuarto.

La segunda afirmación permite concluir que el tercer término es pequeño comparado con los dos primeros. Consecuentemente, se puede despreciar el tercer término, obteniendo finalmente la ecuación de onda paraxial en coordenadas rectangulares:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - 2jk \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \quad (3.5)$$

Soluciones para la ecuación de onda paraxial son los modos Gaussianos que forman las bases para el diseño de sistemas cuasi-ópticos. No hay un corte riguroso para la aplicación de la aproximación paraxial, pero es generalmente buena mientras la divergencia angular del haz esté confinada a 0.5 radianes (30°) del eje z .

-Solución fundamental de los modos de los haces Gaussianos en coordenadas cilíndricas

Soluciones de la ecuación de onda paraxial se pueden obtener en varios sistemas de coordenadas; además del sistema de coordenadas utilizado anteriormente, la simetría axial que caracteriza muchas situaciones encontradas en la práctica (por ejemplo antenas de bocina corrugadas y lentes) hacen a las coordenadas cilíndricas la opción más natural.

En coordenadas cilíndricas, r representa la distancia perpendicular de los ejes de propagación, tomando de nuevo el eje z , y la coordenada angular es representada por φ . En este sistema de coordenadas la ecuación paraxial es:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} - 2jk \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad (3.6)$$

donde $u \equiv u(r, \varphi, z)$.

Por el momento se asumirá que existe simetría axial, esto es, u es independiente de φ , que hace que el tercer término de la ecuación 3.6 sea igual a cero, con lo cual se obtendrá la ecuación de onda paraxial con simetría axial:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - 2jk \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \quad (3.7)$$

Como trabajo previo, ha de notarse que la solución simple de dicha ecuación se puede escribir de la forma siguiente:

$$u(r, z) = A(z) \exp \left[\frac{-jkr^2}{2q(z)} \right], \quad (3.8)$$

en donde A y q son dos funciones complejas. Obviamente, esta expresión para u se parece algo a la distribución Gaussiana. Para obtener los términos desconocidos de la ecuación 3.8, se sustituye esta expresión por u en la ecuación de onda paraxial de simetría axial 3.7 y se obtiene:

$$-2jk \left(\frac{A}{q} + \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \frac{k^2 r^2 A}{q^2} \left(\frac{\partial q}{\partial z} - 1 \right) = 0. \quad (3.9)$$

Ya que esta ecuación debe ser satisfecha por todas las r como por todas las z , y dado que la primera parte depende solo de z , mientras que la segunda parte depende de r y z , las dos partes deben individualmente ser igual a cero. Esto da lugar a dos relaciones que deben satisfacerse simultáneamente:

$$\frac{\partial q}{\partial z} = 1 \quad (3.10a)$$



$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{A}{q}. \quad (3.10b)$$

La ecuación 3.10 tiene la siguiente solución:

$$q(z) = q(z_0 + (z - z_0)). \quad (3.11a)$$

Sin perder la generalidad, se define la posición de referencia a lo largo del eje z en $z=0$ que implica que:

$$q(z) = q(0) + z. \quad (3.11b)$$

La función que se llama parámetro de haz complejo o simplemente parámetro de rayo o parámetro de rayo Gaussiano:

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q}\right)_r - j \left(\frac{1}{q}\right)_i, \quad (3.12)$$

sustituyendo en la ecuación 3.8, el término exponencial se convierte en

$$\exp\left(\frac{-jkr^2}{2q}\right) = \exp\left[\left(\frac{-jkr^2}{2}\right)\left(\frac{1}{q}\right)_r - \left(\frac{kr^2}{2}\right)\left(\frac{1}{q}\right)_i\right]. \quad (3.13)$$

El término imaginario tiene la forma de la variación de fase producida por un frente de onda esférica en el límite paraxial. Se puede ver esto comenzando con una superficie de igual fase con radio de curvatura R y definiendo $\phi(r)$ para ser la variación de fase relativa a un plano para valor fijado de z como función de r como se ve en la fórmula 3.1. En el límite $r \ll R$, el retardo de fase es aproximadamente igual a:

$$\phi(r) \cong \frac{\pi r^2}{\lambda R} = \frac{kr^2}{2R}. \quad (3.14)$$

Se tiene también que:

$$\left(\frac{1}{q}\right)_r = \frac{1}{R}. \quad (3.15)$$

Con R el radio de curvatura del rayo. El radio de curvatura del rayo dependerá de la posición en el eje de propagación.

La segunda parte de la exponencial de la ecuación 3.13 es real y tiene una variación Gaussiana como función de la distancia desde el eje de propagación. Tomando la forma estándar para una distribución Gaussiana se tiene:



$$f(r) = f(0) \exp \left[- \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right], \quad (3.16)$$

Se puede observar que r_0 representa la distancia relativa del punto 1/e al valor del eje. Para hacer que la segunda parte de la ecuación 3.13 tenga esta forma se toma:

$$\left(\frac{1}{q} \right)_i = \frac{2}{k\omega^2(z)} = \frac{\lambda}{\pi\omega^2}, \quad (3.17)$$

y de esta forma se define el radio del haz ω , que es el valor del radio al cual el campo cae 1/e respecto al valor de su eje. Ya que es función de z , el radio del haz al igual que el radio de curvatura, dependerá de la posición a lo largo del eje de propagación. Con todo esto se tiene:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{j\lambda}{\pi\omega^2}, \quad (3.18)$$

por lo que la distribución relativa de campo en $z=0$ es:

$$u(r, 0) = u(0,0) \exp \left(- \frac{r^2}{\omega_0^2} \right), \quad (3.19)$$

donde ω_0 denota el radio del haz en $z=0$, que es llamado radio del ancho de haz mínimo:

$$q = \frac{j\pi\omega_0^2}{\lambda} + z. \quad (3.20)$$

Por tanto, el radio de curvatura y el radio del haz quedan:

$$R = z + \frac{1}{z} \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \right)^2 \quad (3.21a)$$

$$\omega = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2} \right)^2 \right]^{0.5}. \quad (3.21b)$$

Se observa que el radio del ancho de haz mínimo es el mínimo valor del radio del haz y esto ocurre en el ancho de haz mínimo, donde el radio de curvatura es infinito, característica del frente de onda plano. La extensión transversal de un haz Gaussiano mientras se propaga, está ilustrada en la figura 3.2a, mientras que el comportamiento del radio de curvatura se muestra esquemáticamente en la figura 3.2b. La cantidad $\pi\omega_0^2/\lambda$ es la llamada distancia cofocal.

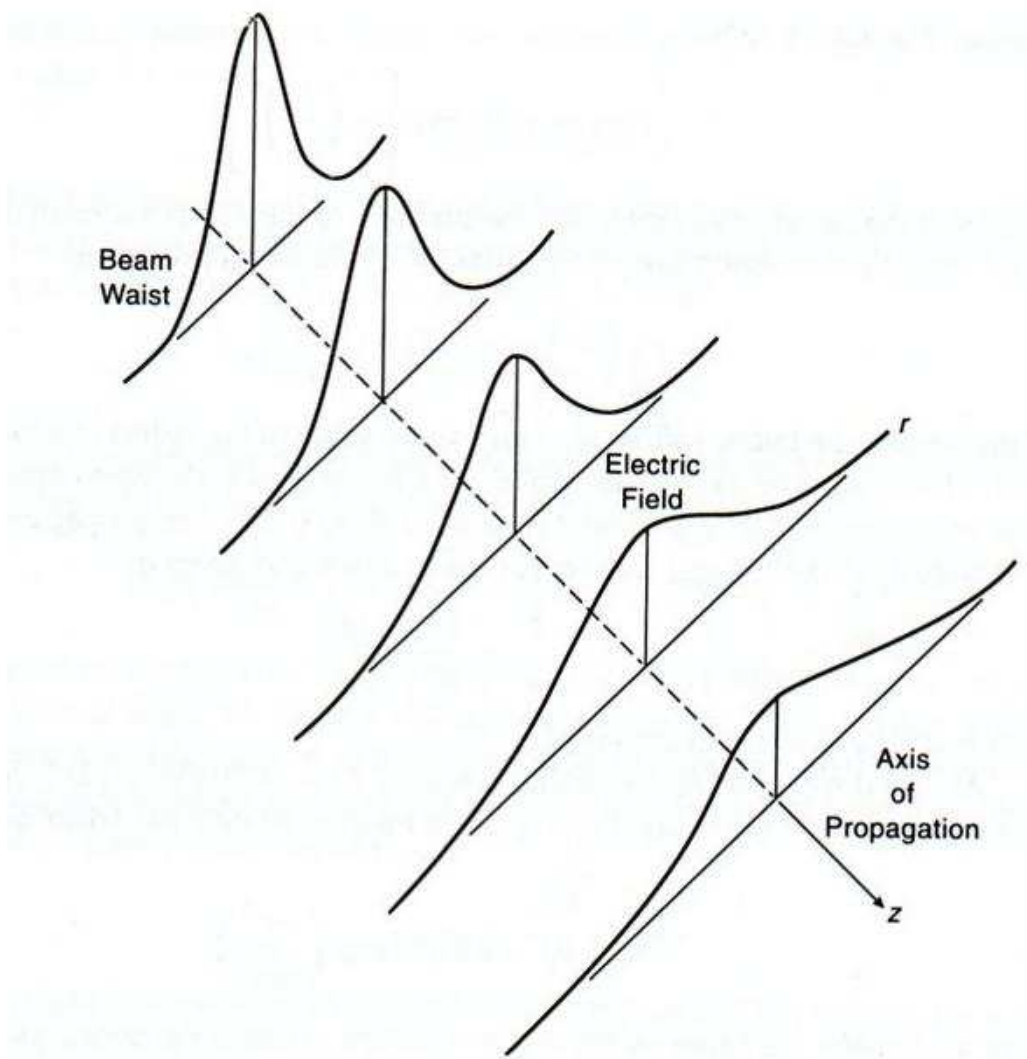


Figura 3.2a: Propagación del haz Gaussiano. Aumenta el radio del haz y disminuye el pico de amplitud conforme la distancia aumenta

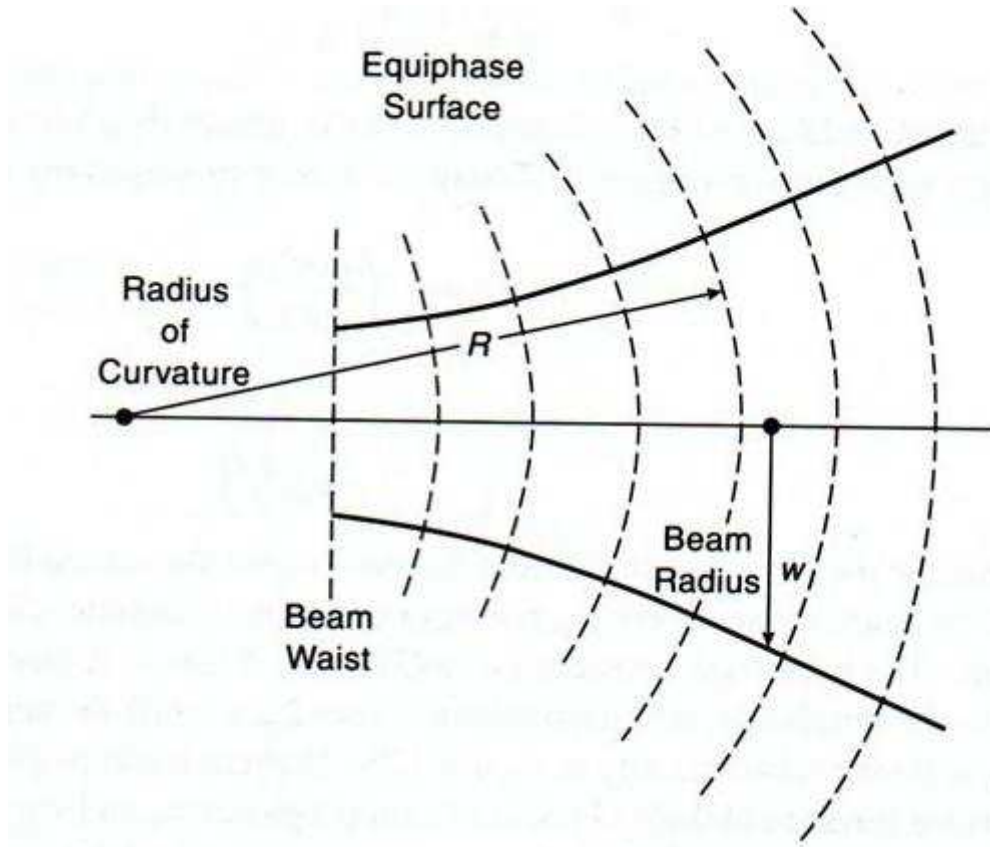


Figura 3.2b: Corte del haz Gaussiano mostrando las superficies de igual fase, el radio del haz y el radio de curvatura.

Para terminar se tiene que el desplazamiento de fase del haz Gaussiano, ϕ_0 , se define como:

$$\tan \phi_0 = \frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2}. \quad (3.22)$$

Y de esta forma se obtiene la expresión completa para el modo fundamental del haz Gaussiano:

$$u(r, z) = \left(\frac{\omega_0}{w}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2} - \frac{j\pi r^2}{\lambda R} + j\phi_0\right). \quad (3.23)$$

Y la expresión del campo eléctrico:

$$u(r, z) = \left(\frac{\omega_0}{w}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2} - jkz - \frac{j\pi r^2}{\lambda R} + j\phi_0\right). \quad (3.24)$$

Al normalizar se obtiene:

$$u(r, z) = \left(\frac{2}{\pi \omega^2}\right)^{0.5} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2} - jkz - \frac{j\pi r^2}{\lambda R} + j\phi_0\right). \quad (3.25a)$$

Y junto con estas ecuaciones:

$$R = z + \frac{1}{z} \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)^2, \quad (3.25b)$$

$$\omega = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (3.25c)$$

$$\tan \varphi_0 = \frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2}, \quad (3.25d)$$

se describe completamente el comportamiento del modo fundamental del haz Gaussiano que satisface la ecuación transversal.

-Modo fundamental del haz Gaussiano en coordenadas rectangulares: una dimensión

La ecuación de onda paraxial para la variación a lo largo del eje x queda reducida a:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 2jk \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \quad (3.26)$$

Analizando esto se descubre que la solución tiene la misma forma que en el caso de simetría axial. Con todo esto, la forma normalizada de la distribución del campo eléctrico quedará de la siguiente manera:

$$E(x, z) = \left(\frac{2}{\pi \omega_x^2} \right)^{0.25} \exp \left(-\frac{x^2}{\omega_x^2} - jkz - \frac{j\pi x^2}{\lambda R_x} + j \frac{\varphi_{0x}}{2} \right), \quad (3.27)$$

con R_x , ω_x y φ_{0x} definidas en la ecuaciones 3.25b, 3.25c y 3.25d.

- Modo fundamental del haz Gaussiano en coordenadas rectangulares: dos dimensiones

La distribución de campo es simplemente el producto de las porciones x e y, y su forma normalizada:

$$E(x, z) = \left(\frac{2}{\pi \omega_x^2 \omega_y^2} \right)^{0.5} \exp \left(-\frac{x^2}{\omega_x^2} - \frac{y^2}{\omega_y^2} - \frac{j\pi x^2}{\lambda R_x} - \frac{j\pi y^2}{\lambda R_y} + j \frac{\varphi_{0x}}{2} + j \frac{\varphi_{0y}}{2} \right), \quad (3.28a)$$

donde

$$\omega_x = \omega_{0x} \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_{0x}^2} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (3.28b)$$

$$\omega_y = \omega_{0y} \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_{0y}^2} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (3.28c)$$

$$R_x = z + \frac{1}{z} \left(\frac{\pi \omega_{0x}^2}{\lambda} \right)^2, \quad (3.28d)$$

$$R_y = z + \frac{1}{z} \left(\frac{\pi \omega_{0y}^2}{\lambda} \right)^2, \quad (3.28e)$$

$$\varphi_{0x} = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_{0x}^2} \right), \quad (3.28f)$$

$$\varphi_{0y} = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_{0y}^2} \right). \quad (3.28g)$$

Se puede tratar con haces Gaussianos asimétricos, si estos son apropiados a la situación, y se puede considerar enfocar un rayo Gaussiano a lo largo del eje individual independientemente de su variación en la dirección ortogonal.

Se ha nombrado anteriormente la distancia cofocal pero se va a describir un poco más detalladamente.

Se tiene que la distancia cofocal o el parámetro cofocal viene dado por:

$$z_c = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (3.29)$$

Es fácil notar que este parámetro podría ser definido en un sistema de coordenadas de una sola dimensión en términos de ω_{0x} o ω_{0y} . La distancia cofocal se denomina algunas veces rango de Rayleigh y es denotada por z_0 o por \hat{z} . Usando la definición conocida para la distancia cofocal, los parámetros de haz Gaussiano se pueden reescribir como:

$$R = z + \frac{z_c^2}{z}, \quad (3.30a)$$

$$\omega = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_c} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (3.30b)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{z}{z_c} \right). \quad (3.30c)$$

La región de transición ocurre en la distancia cofocal, z_c .

En el ancho de haz mínimo, el radio del haz ω alcanza su valor mínimo ω_0 , y la distribución del campo eléctrico está más concentrada como se ve en la figura 3.2a. Como se requiere para la conservación de energía, el campo eléctrico y las distribuciones de potencias tienen su valor máximo en el eje en el ancho de haz mínimo. El radio de curvatura del haz Gaussiano es infinito ahí, ya que el frente de fase es plano en el ancho de haz mínimo. También se tiene que el desplazamiento de fase ϕ_0 , es cero por definición en el ancho de haz mínimo.

A parte del ancho de haz mínimo, el radio del haz aumenta monótonamente, como se describe en la ecuación 3.30b y se ve en la figura 3.3, la variación de ω con z parece ser hiperbólica. En el campo cercano el radio del haz no ha cambiado esencialmente su valor en el ancho de haz mínimo; $\omega \leq \sqrt{2}\omega_0$. Así que, se puede decir que la distancia cofocal define la distancia sobre la cual el haz Gaussiano se propaga sin ningún crecimiento significativo. Al alejarse del ancho mínimo, el radio de curvatura, decrece hasta que se alcanza la distancia z_c .

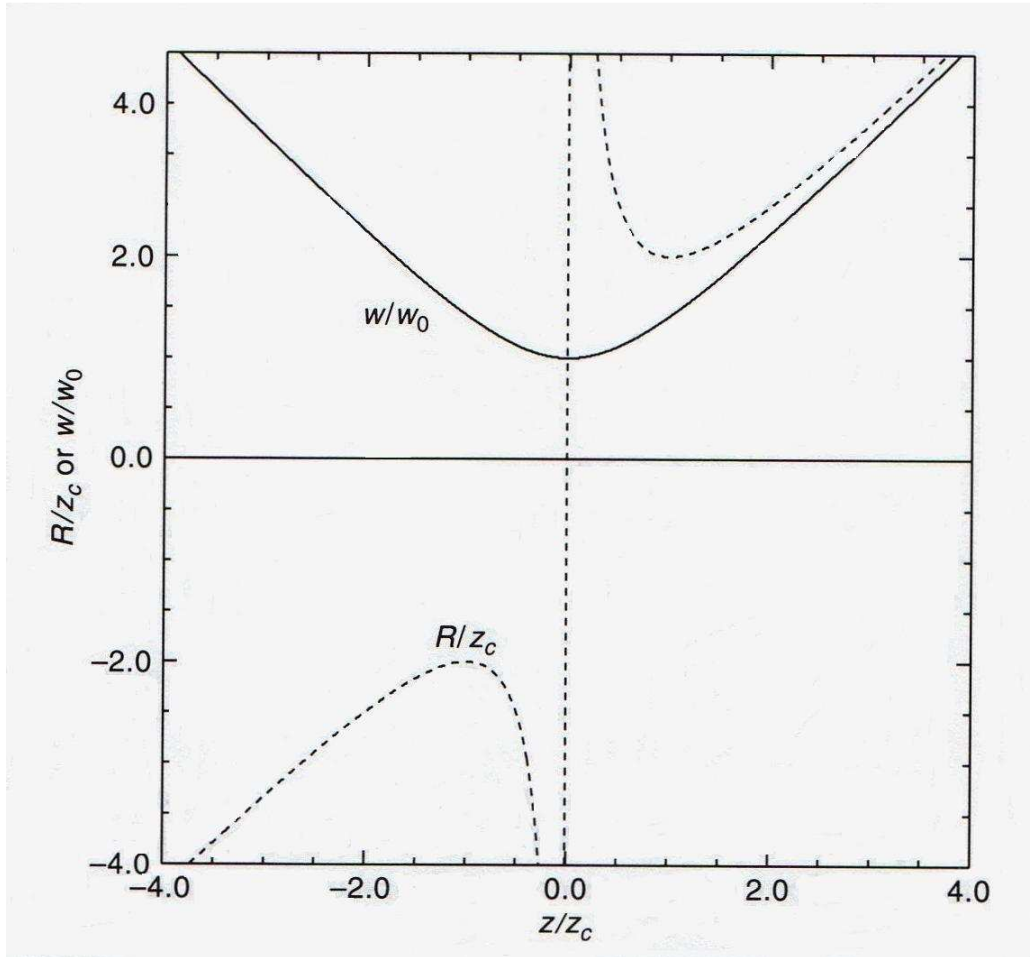


Figura 3.3: variación del radio del haz ω y del radio de curvatura R de un haz Gaussiano como función de la distancia z del ancho mínimo del haz.

A una distancia del ancho mínimo igual a z_c , el radio del haz es igual a $\sqrt{2}\omega_0$, el radio de curvatura alcanza su mínimo valor igual a $2z_c$, y el desplazamiento de fase es igual a $\pi/4$. A distancias del ancho mínimo mayores que z_c , el radio del haz crece significativamente, y el radio de curvatura decrece.

En el campo lejano, $z \gg z_c$, el radio del haz crece linealmente con la distancia. El crecimiento del radio 1/e del campo eléctrico puede ser definido en términos del ángulo $\theta = \tan^{-1}(\omega/z)$ y en el límite del campo lejano se obtiene el ángulo del crecimiento asintótico del haz, dado por:

$$\theta_0 = \lim_{z \gg z_c} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\omega}{z} \right) \right] = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda}{\pi \omega_0} \right). \quad (3.31)$$



La aproximación para un ángulo pequeño generalmente se usa satisfactoriamente en el límite paraxial, donde:

$$\theta_0 \approx \frac{\lambda}{\pi\omega_0}. \quad (3.32)$$

De todo lo anterior también se concluye que el radio de curvatura aumenta linealmente con la distancia, ya que para $z \gg z_c$, $R \rightarrow z$.

Algunas fórmulas útiles que resumen la propagación del modo fundamental simétrico de un haz Gaussiano son las expuestas en la siguiente tabla:

TABLA 3.1 Resumen de las fórmulas del modo fundamental del haz Gaussiano

$E(r, z) = \left(\frac{2}{\pi\omega^2(z)} \right)^{0.5} \exp \left(-\frac{r^2}{\omega^2(z)} - jkz - \frac{j\pi r^2}{\lambda R(z)} + j\varphi_0(z) \right)$	<i>Distribución transversal del campo</i>
$\omega = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2} \right)^2 \right]^{0.5}$	<i>Radio del haz</i>
$\frac{P(r)}{P(0)} = \exp \left[-2 \left(\frac{r}{\omega(z)} \right)^2 \right]$	<i>Distribución transversal de potencia relativa al eje de propagación</i>
$Te(dB) = 8.686 \left(\frac{r_e}{\omega} \right)^2$	<i>Edge Taper</i>
$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi\omega_0}$	<i>Ángulo de divergencia en campo lejano</i>
$R(z) = z + \frac{\left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \right)^2}{z}$	<i>Radio de curvatura</i>
$\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2} \right)$	<i>Desplazamiento de fase</i>





4-TRANSFORMACIÓN DEL HAZ GAUSSIANO

4.1-INTRODUCCIÓN

La propagación de haces Gaussianos analizada anteriormente trata con el crecimiento de un haz de radiación fuera del ancho de haz mínimo, donde la distribución de amplitud perpendicular a la dirección de propagación es más concentrada y el frente de fase es plano.

Se podría usar una antena de bocina para producir tal ancho de haz mínimo, que podría incluir principalmente un modo fundamental del haz Gaussiano, o una combinación de diferentes modos. Las fórmulas desarrolladas en el apartado anterior permiten calcular el campo eléctrico como una función de la distancia desde el ancho mínimo, y después de propagarse por una distancia del orden de la distancia cofocal, $z_c = \pi\omega_0^2/\lambda$, el rayo habrá crecido significativamente. Si se consideran distancias mucho más grandes que z_c , el tamaño del haz crece linealmente con la distancia, y se encuentra en el campo lejano, con el área del haz siendo mucho mayor que el área de la apertura de la radiación original.

Obviamente, para hacer un sistema cuasi-óptico, se debe confinar el haz de radiación, que simplemente significa evitar el crecimiento monótono de un haz Gaussiano inalterado. Este proceso es llevado a cabo de una manera similar a la empleada en los sistemas ópticos “tradicionales”. Mediante el empleo de lentes y espejos, se puede cambiar el radio de curvatura para producir una convergencia del rayo.

Es aparente que un rayo convergente se propagará a otro ancho de haz mínimo, después del cual reanudará su expansión. El proceso de alteración de las propiedades de un rayo Gaussiano es llamado transformación del haz. Mientras que hay claras similitudes a la hora de enfocar en óptica convencional (o geométrica), la terminología diferente recuerda que en cuasi-óptica no hay “focos” en sentido de la radiación concentrada en un punto. Lo que puede hacerse es transformar un ancho de haz mínimo en otro como se muestra en la figura 4.1.

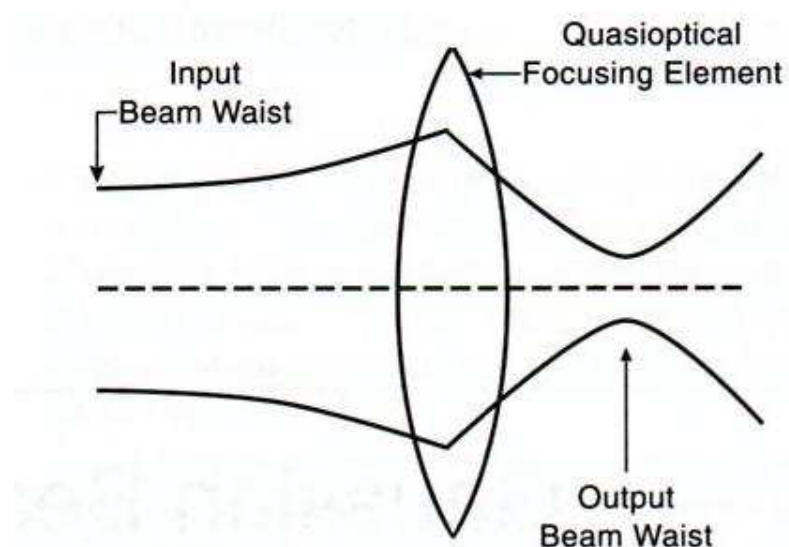


Figura 4.1: Transformación de un haz Gaussiano por medio de un elemento de enfoque.

En este apartado se van a desarrollar las fórmulas básicas la teoría de rayos Gaussianos. Este análisis se va a realizar para el modo fundamental del haz Gaussiano. Primero, porque este modo es el más simple y fácil de entender y segundo, y más importante, porque un modo fundamental del haz Gaussiano describe la radiación de una variedad de tipos de antenas y alimentadores bastante bien. Por lo tanto, se puede hacer satisfactoriamente el trabajo de calcular el comportamiento de un sistema cuasi-óptico simplemente tratando con el modo Gaussiano fundamental representando el patrón de radiación para el alimentador de interés. Sin embargo, ya que el comportamiento del radio del haz w y el radio de curvatura R es el mismo para todos los modos Gaussianos, las fórmulas que dan el comportamiento de estos parámetros se aplican a órdenes mayores al igual que para el fundamental. La única diferencia es el desplazamiento de fase ϕ , que es dependiente del modo y puede crear diferencias en algunas situaciones.

El enfoque adoptado aquí es utilizar las matrices de rayos para haces paraxiales conjuntamente con el parámetro de haces complejo q . A pesar de las definitivas limitaciones en términos de tratamiento “rápido” al igual que en sistemas ópticos fuera de ejes, esto es una herramienta de primer orden bastante para la mayor parte de los diseños de guía onda.

4.2-MATRICES DE RAYOS Y PARÁMETRO COMPLEJO DEL HAZ

La similitud entre el parámetro de rayos complejo que describe un haz Gaussiano y el radio de curvatura de la representación de un rayo óptico geométrico sugiere que los sistemas cuasi-ópticos pueden ser analizados en términos de su efecto de una manera análoga al tratamiento de rayos en un sistema óptico geométrico lineal. En este enfoque, la localización y la pendiente

de un haz a la salida del plano de un sistema paraxial son definidos para ser funciones lineales de los parámetros del haz de entrada.

Los términos y los elementos del sistema aquí representan algo desde el más simple elemento, tal como una interfaz entre dos medios, hasta un sistema completo con múltiples elementos. Denotando la posición como r y la pendiente como r' , se puede escribir una relación lineal entre la posición y pendiente de entrada y las de salida como:

$$\begin{aligned} r_{out} &= Ar_{in} + Br'_{in} \\ r'_{out} &= Cr_{in} + Dr'_{in} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Se observa que aquí r' representa la actual pendiente del haz. Si la posición del rayo y la pendiente son tratadas como una matriz columna, el efecto del elemento del sistema puede ser descrito:

$$\begin{bmatrix} r_{out} \\ r'_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{in} \\ r'_{in} \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Ya que el radio de curvatura está definido por $R=r/r'$, se tiene la siguiente relación:

$$R_{out} = \frac{AR_{in} + B}{CR_{in} + D}. \quad (4.3)$$

Y también se obtiene:

$$q_{out} = \frac{Aq_{in} + B}{Cq_{in} + D}. \quad (4.4)$$

Los parámetros A, B, C y D son los mismos para elementos de sistemas ópticos geométricos. Los elementos ABCD, se combinan en matrices 2x2 como se ve en la ecuación 4.2, formando la matriz de transferencia de rayos del sistema.

La ley ABCD es una enorme ayuda para el análisis cuasi-óptico, ya que toda la teoría óptica geométrica de rayos puede ser aplicada a la representación del haz Gaussiano de un sistema. Adoptando la convención de que los rayos inciden de la izquierda, se obtiene la matriz representando los efectos de una secuencia de elementos multiplicando las respectivas matrices ABCD, empezando con la del primer elemento encontrado por el rayo multiplicándola por la matriz para cada subsecuencia de elementos colocados a la izquierda en la ecuación de la matriz. Esto es, una secuencia de un elemento encontrado al principio es descrita por una matriz que opera en el sistema de matrices precedente. Se obtiene el parámetro del haz complejo a la salida del sistema usando la matriz representando el sistema completo de interés y la ecuación 4.4.

De la ecuación 3.18 para el parámetro de haz complejo, se determina ω , el radio del haz y R, el radio de curvatura, usando:

$$\omega = \left[\frac{\lambda}{\pi \operatorname{Im}(-\frac{1}{q})} \right]^{0.5}$$

$$R = \left[\operatorname{Re} \left(\frac{1}{q} \right) \right]^{-1}. \quad (4.5)$$

La matriz de transferencia de rayos más básica es aquella para una distancia L de propagación en un material uniforme de índice de refracción uniforme como se indica en la figura 4.2. Esto cambia la compensación del rayo con el eje en una cantidad proporcional a r'_{in} pero no cambia la pendiente del rayo.

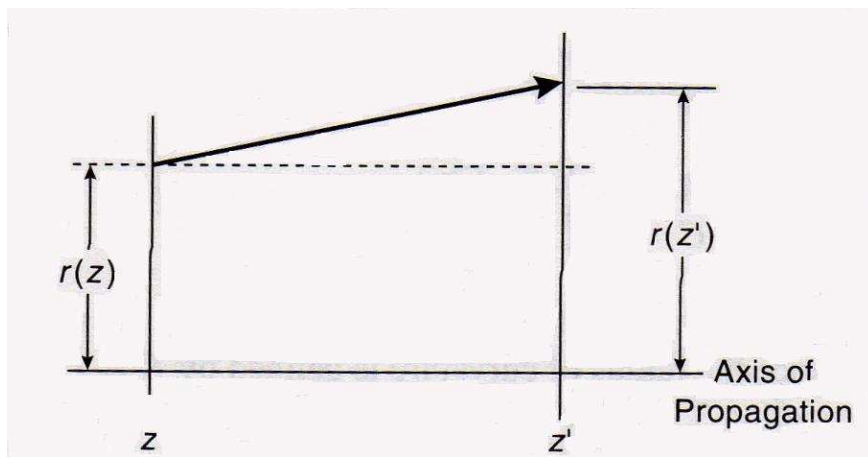


Figura 4.2 Propagación de rayos en espacio libre. La distancia del rayo al eje de propagación es r , y la pendiente r' .

Con la definición usada aquí, la matriz de transferencia de rayos se define como:

$$M_{dist} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

sin tener en cuenta el índice de refracción.

La segunda matriz fundamental es la de la interfaz entre medios de diferentes índices de refracción, que se ilustra en la imagen 4.3. Atravesar una interfaz cambia la pendiente del rayo pero no afecta a su posición. La matriz de rayos se encuentra aplicando la ley de Snell para un rayo incidente en la interfaz [GUE90]. Esto es aplicable para una superficie cóncava a la izquierda, dirección desde la cual los rayos inciden, con $R > 0$.

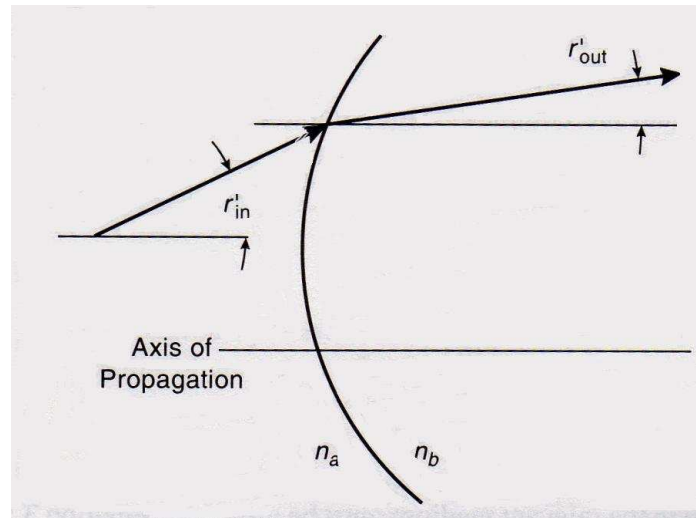


Figura 4.3 Propagación del rayo en una interfaz entre dos medios con distinto índice de refracción n_a y n_b .

Un bloque de material de índice de refracción n_2 y grosor L incrustado en un medio de índice de refracción n_1 consiste en una interfaz plana ($R = \infty$) de n_1 a n_2 seguido por una distancia L en n_2 , y finalmente una interfaz plana de n_2 a n_1 . Se colocan las matrices en la ecuación en forma de matriz desde la derecha a la izquierda en el orden en el que los rayos encuentran las partes constituyentes del sistema.

TABLA 4.1 Algunos ejemplos de matrices de transformación de rayos

Distancia L en un medio uniforme (ningún índice)

$$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Interfaz curvada con índice de refracción desde n_1 a n_2 ; $R > 0$ si es cóncava a la izquierda; para una interfaz plana tomar el límite $R \rightarrow \infty$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$$

Lentes delgadas con distancia focal f

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

Para una lente fina de un material con índice n_2 , incrustado en material de índice n_1 , con radio de curvatura de la primera superficie R_2 y de la segunda superficie R_1 :

$$\frac{1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right)$$

Para un espejo esférico de radio de curvatura R ,

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{R}$$

Para un espejo elíptico,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}$$

Donde d_1 y d_2 son las distancias desde el centro de la sección de la elipse usada a su respectivo foco.

Para un bloque de grosor L en un material de índice n_2 incrustado en un material de índice n_1

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{Ln_1}{n_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para lentes gruesas con la primera superficie R_1 , segunda superficie R_2 , grosor d de un material de índice n_2 incrustado en un material de índice n_1 .

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{(n_2 - n_1)d}{n_2 R_1} & \frac{n_1 d}{n_2} \\ -\frac{1}{f} - \frac{(n_2 - n_1)^2 d}{n_1 n_2 R_1 R_2} & 1 + \frac{(n_2 - n_1)d}{n_2 R_2} \end{bmatrix}$$

Para lentes gruesas como para lentes finas

$$\frac{1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right)$$

Par de lentes finas, la primera f_1 y la segunda f_2 , separadas por la suma de las longitudes de sus focos

$$\begin{bmatrix} \frac{-f_2}{f_1} & f_1 + f_2 \\ 0 & \frac{-f_1}{f_2} \end{bmatrix}$$

Por tanto se tiene que:

$$M_{slab} = \begin{bmatrix} \text{interfaz plana} \\ 2 \rightarrow 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{distancia } L \\ \text{en } 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{interfaz plana} \\ 1 \rightarrow 2 \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

y sustituyendo en las matrices dadas en la tabla 4.1, se encuentra:

$$M_{slab} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{Ln_1}{n_2} \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

$$M_{slab} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{Ln_1}{n_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Una lente fina es un elemento de enfoque que consiste en una o dos interfaces curvas, pero con separación física y grosor desconocidas. La matriz ABCD para tal superficie de radio de curvatura R es:

$$M_{interfaz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}, \quad (4.10)$$

donde n_1 es el índice de refracción de la región de la izquierda y n_2 el de la región de la derecha. Si se tienen dos interfaces curvadas definiendo una región de índice n_2 en un medio de índice n_1 pero se desconoce su separación, la matriz ABCD es simplemente el producto de las dos matrices de las interfaces curvadas. De esta forma se tiene la matriz para índice de $1 \rightarrow 2$ con curvatura R_1 multiplicada a su izquierda por la matriz de índice $2 \rightarrow 1$ con curvatura R_2 :

$$M_{lente\ fina} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{n_1 R_2} & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R_1} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}, \quad (4.11)$$

que da lugar a:

$$M_{lente\ fina} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Si se considera un rayo viajando paralelo al eje z que encuentra una lente fina de distancia focal f , se sabe que cruza el eje z una distancia f después de que haya atravesado la lente. Su pendiente después de que haya atravesado dicha lente es $-h/f$ donde h es la altura inicial del rayo sobre el eje z . Es sencillo mostrar la matriz de transformación de rayos cuyo efecto es el mencionado antes:

$$M_{lente\ fina} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

que permite establecer la relación siguiente:

$$\frac{1}{f_{lente\ fina}} = -C_{lente\ fina} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right). \quad (4.14)$$

Para obtener la matriz para lentes gruesas, se incluye la distancia entre las interfaces pero se desconoce el cambio de distancia producido en la curvatura del contorno. La matriz para este

sistema es por tanto, el producto de 3 matrices. Así, el primer elemento va a ser una interfaz entre el medio de índice n_1 y el medio de índice n_2 teniendo radio de curvatura R_1 , el segundo es una distancia d en el medio de índice n_2 , y la tercera es una interfaz entre el medio de índice n_2 y el medio de índice n_1 teniendo radio de curvatura R_2 . De esta forma se obtiene:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{n_1 R_2} & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R_1} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

En el límite paraxial, un espejo de radio de curvatura R es equivalente a una lente fina de distancia focal $f=R/2$. Un espejo elíptico, en el límite óptico geométrico, transforma la radiación desde un punto de la fuente en un foco hasta un punto de la fuente localizado en el segundo foco. Primero se considera una lente que tiene una distancia focal igual a la distancia desde el primer foco al centro de la parte de la superficie elíptica usada (R_1). Esta lente colimará la radiación desde el primer foco en un haz paralelo. Si inmediatamente se sigue la primera lente por una segunda, teniendo la distancia focal igual a la distancia desde el centro del espejo al segundo foco (R_2), la segunda lente traerá el rayo paralelo a un foco a la posición deseada. De esta forma, la matriz ABCD para un espejo elíptico es el producto de dos matrices, cada una representando una lente fina, y teniendo separación cero:

$$M_{elíptica} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.16a)$$

así que, comparándolo con la expresión para la lente fina, se ve que:

$$\frac{1}{f_{elíptica}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (4.16b)$$

Es importante recordar que las distancias R_1 y R_2 en esta expresión son las distancias desde el centro de la sección de la elipse empleada al foco de la elipse generada. Esta expresión es claramente independiente de la dirección en la que la radiación está viajando.

4.3-TRANSFORMACIÓN DEL HAZ GAUSSIANO CON ELEMENTOS ENFOCADORES

La transformación del haz Gaussiano es de particular importancia en sistemas cuasi-ópticos por dos razones. Primero, como regla general, uno tiene que evitar que los rayos crezcan a un diámetro excesivo, y los elementos de enfoque deben ser empleados para este propósito. Además para límites superiores del radio del haz, hay a menudo límites más bajos para el ancho de haz mínimo ω_0 . Está establecido por algunos componentes cuasi-ópticos, y ellos resultan de la correspondencia entre un radio del haz mínimo y un haz altamente colimado.

Un elemento de enfoque puede por tanto, transformar un haz caracterizado por un ancho mínimo relativamente pequeño, como el producido por una bocina, a un radio del haz mínimo requerido, por ejemplo, un interferómetro.



La segunda necesidad para la transformación del haz Gaussiano surge a menudo, ya que frecuentemente se quiere emparejar un haz de un aparato (por ejemplo, antena de bocina o láser en submilimétricas) con otro aparato, tales como un detector o una antena. Para hacer esto eficientemente, se deben “emparejar” los rayos Gaussianos aceptados por los componentes de cada interfaz dentro del sistema cuasi-óptico, una tarea que es llevada a cabo por la transformación del haz.

4.4-TRANSFORMACIÓN POR UN SISTEMA CUASI-ÓPTICO

Las propiedades de la transformación general de un haz de un sistema cuasi-óptico pueden ser encontradas usando la ley ABCD [KOG65]. La situación mostrada en la figura 4.4 consiste en un ancho mínimo localizado a una distancia de entrada d_{in} del plano de referencia de entrada de un sistema teniendo la matriz ABCD definida en términos de transformación desde el plano de entrada a los planos de referencia de salida. Se encuentra el parámetro del haz complejo de la matriz M, que representa la propagación a través de una distancia d_{in} , transformación por el sistema, y finalmente propagándose a través de una distancia d_{out} descrita anteriormente:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & d_{out} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_{in} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + Cd_{out} & Ad_{in} + B + d_{out}(Cd_{in} + D) \\ C & Cd_{in} + D \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Con $q_{in} = jz_c$, se tiene que:

$$q_{out} = \frac{(A + Cd_{out})jz_c + [(A + Cd_{out})d_{in} + (B + Dd_{out})]}{Cjz_c + Cd_{in} + D}. \quad (4.18)$$

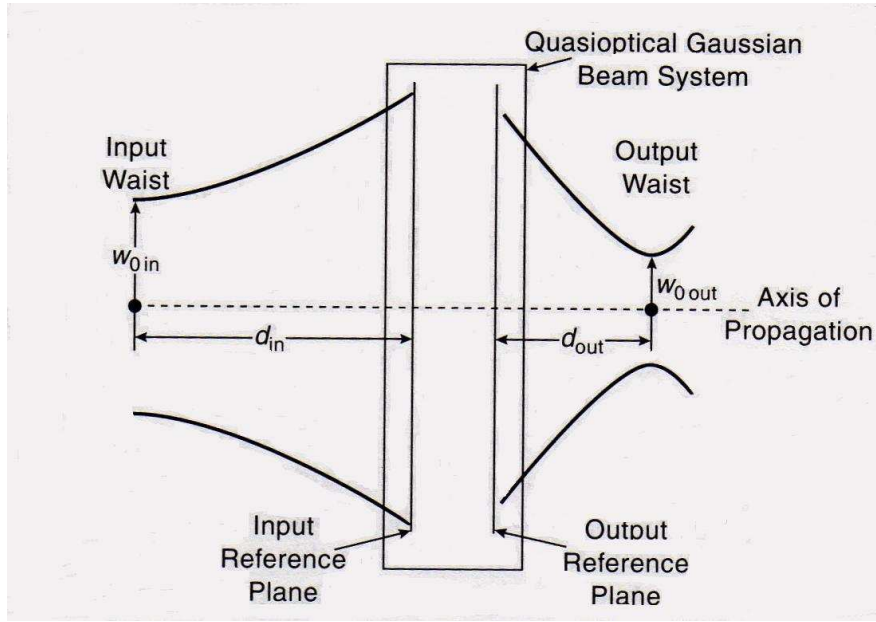


Figura 4.4 Transformación de un haz Gaussiano mediante un sistema cuasi-óptico caracterizado por su matriz ABCD. El ancho de haz mínimo de entrada es w_{0in} a una distancia d_{in} desde el plano de referencia de entrada, y el ancho de haz mínimo de salida es w_{0out} , localizado a una distancia d_{out} del plano de referencia de salida.

Se puede obtener los parámetros que describen el ancho mínimo de salida imponiendo el requerimiento de que el parámetro de haz complejo sea puramente imaginario en ese punto. Resolviendo para la parte real de q , se obtiene la distancia del sistema al ancho mínimo de salida, d_{out} , y el ancho mínimo de salida, w_{0out} :

$$d_{out} = -\frac{(Ad_{in} + B)(Cd_{in} + D) + ACz_c^2}{(Cd_{in} + D)^2 + C^2z_c^2}. \quad (4.19a)$$

Evaluando la expresión para la parte imaginaria con $\|ABCD\| = 1$ resulta:

$$w_{0out} = \frac{w_{0in}}{[(Cd_{in} + D)^2 + C^2z_c^2]^{0.5}}. \quad (4.19b)$$

Es necesario recordar que estas ecuaciones se aplican a cualquier sistema cuasi-óptico, y a cualquier modo del haz Gaussiano en el límite paraxial. El sistema por sí mismo puede ser arbitrariamente complicado, y todo lo que se tiene que hacer es obtener la matriz global de una representación en cascada de los elementos que lo constituyen [GOL86].



5-ÓPTICA GEOMÉTRICA

5.1-INTRODUCCIÓN

La luz es descrita teóricamente de la misma manera que todas las formas de radiación electromagnética ya que se trata de una onda electromagnética. Dicha radiación se propaga como dos ondas vectoriales mutuamente acopladas, una de ellas representa el campo eléctrico E y la otra el campo magnético B . Dicha propagación de ondas de luz es descrita por las ecuaciones de Maxwell.

Sin embargo, cuando la luz se propaga por un sistema físico cuyas dimensiones son mucho mayores que la longitud de onda, el proceso puede describirse simplemente mediante rayos y normas geométricas. A este modelo se le llama óptica de rayos u óptica geométrica.

5.2-POSTULADOS DE LA ÓPTICA GEOMÉTRICA

La óptica geométrica tiene como objetivo determinar las trayectorias de la energía radiante a través de diversos medios o disponer éstos de modo que la propagación se ajuste a determinadas trayectorias. Se concluye por tanto, que la óptica geométrica se ocupa únicamente de temas relacionados con la propagación de la luz.

Los conceptos de rayo luminoso o índice de refracción son de gran importancia a la hora de caracterizar la luz o los medios materiales por los que se propaga, cuando se trata con el concepto de óptica geométrica.

5.2.1-POSTULADOS DE LA ÓPTICA GEOMÉTRICA.

1.-La luz se propaga en forma de rayos que son emitidos por fuentes luminosas.

2.-Un medio óptico es caracterizado por el índice de refracción, n , definido por el cociente entre la luz en el vacío y la su velocidad en el medio:

$$n = \frac{c}{v} \geq 1 \quad (5.1)$$

3.-En un medio no homogéneo el índice de refracción está en función de la posición. El camino óptico entre A y B será:

$$L = \int_A^B n(r) ds \quad (5.2)$$

4.-Principio de Fermat: el camino óptico a lo largo de una trayectoria de luz es estacionario. Esto da como resultado:

$$\delta L = \delta \int_A^B n(r) ds = 0 \quad (5.3)$$

5.2.2-PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN UN MEDIO HOMOGÉNEO

Como el mismo nombre indica, un medio homogéneo es aquél en el que el índice de refracción es el mismo en cualquier parte. De este modo, la velocidad de la luz en dicho medio será constante. Esto implica que las trayectorias de la luz en los medios homogéneos son rectilíneas y por tanto, las trayectorias de los rayos de luz son reversibles.

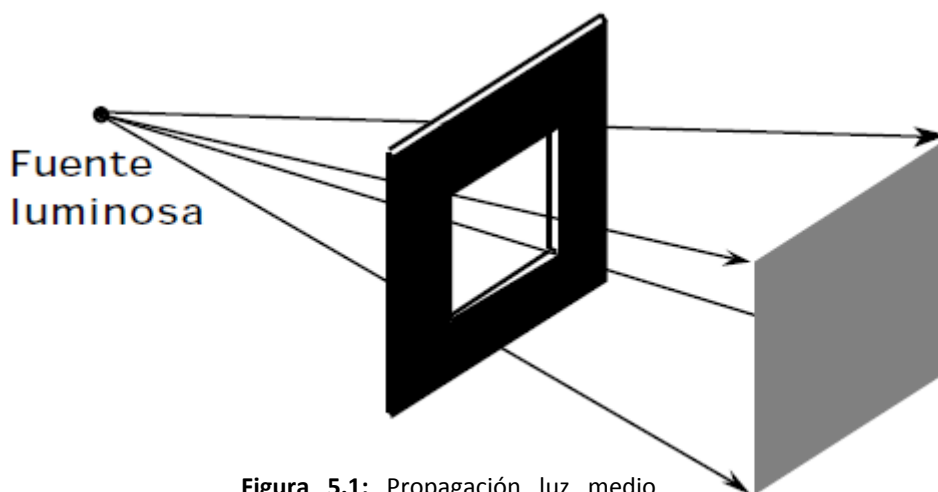


Figura 5.1: Propagación luz medio homogéneo

5.2.3-REFLEXIÓN DE LA LUZ EN UN ESPEJO

Existen distintos tipos de reflexiones, reflexión difusa y reflexión especular. La reflexión difusa es la más común y trata de la reflexión en la cual la luz se refleja en todas direcciones. Dicha reflexión se da cuando las dimensiones de las rugosidades del cuerpo reflectante son grandes comparadas con la longitud de onda de la luz de onda reflejada. El otro tipo de reflexión es la especular y a diferencia de la anterior, esta se da cuando un haz estrecho se refleja en una única dirección. La reflexión especular se da en superficies lisas o en aquellas en las que las irregularidades son despreciables en tamaño comparadas con la longitud de onda de la luz. Esta última reflexión es la que se da en el caso de un espejo y cumple que el rayo incidente y la normal al espejo forman el plano de incidencia, y que el ángulo de incidencia es igual al de reflexión, como se aprecia en la siguiente figura.

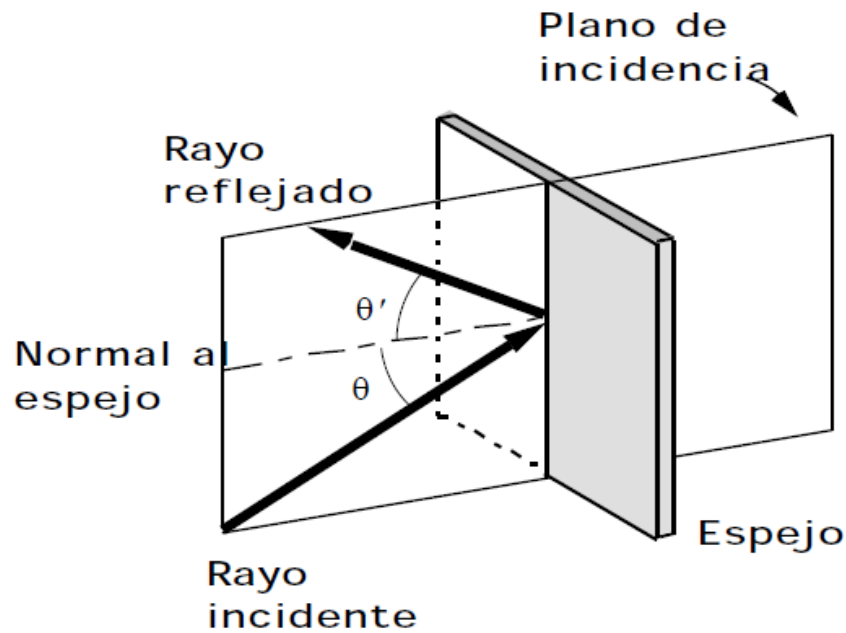


Figura 5.2: Reflexión luz espejo

5.2.4-REFRACCIÓN DE LA LUZ EN UNA SUPERFICIE

Si se tiene una superficie separando dos medios de índices de refracción n_1 y n_2 , y un rayo con ángulo de incidencia θ_1 , según la Ley de Snell se cumplirá que:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (5.4)$$

El rayo refractado se transmite al segundo medio. Dicho rayo está contenido en el plano de incidencia y forma un ángulo θ_2 con la normal.

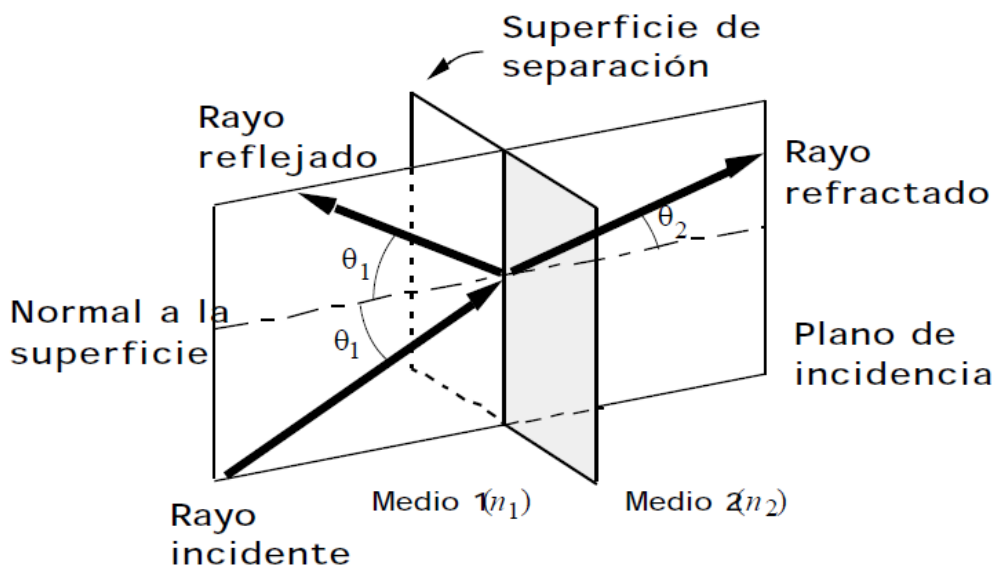


Figura 5.3: Refracción luz en una superficie

5.2.5-ESPEJOS PLANOS

Un espejo se caracteriza por ser una superficie lisa y muy reflectante. Un espejo plano refleja los rayos provenientes de un punto P_1 de forma que los rayos reflejados parecen venir de un punto P_2 situado detrás del espejo y al cuál se le llama imagen. La línea P_1P_2 es perpendicular al plano del espejo y los puntos P_1 y P_2 son equidistantes a él.

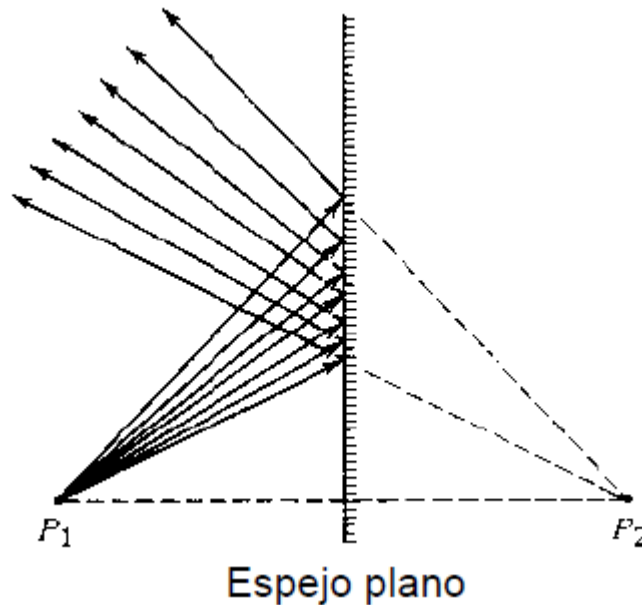


Figura 5.4: Espejo plano

5.2.6-ESPEJOS PARABÓLICOS

La superficie de un espejo parabólico es un paraboloide de revolución. Los espejos parabólicos se caracterizan porque todos los rayos que inciden paralelos al eje del espejo focalizan en un único punto F llamado foco. La distancia SF se denomina distancia focal. El uso principal de los espejos parabólicos es como elementos colectores de luz o para producir haces paralelos a partir de fuentes puntuales de luz. En este último caso, la fuente de luz se sitúa en el foco del espejo y de esta forma se consigue que los rayos después de reflejarse en el espejo sean paralelos al eje.

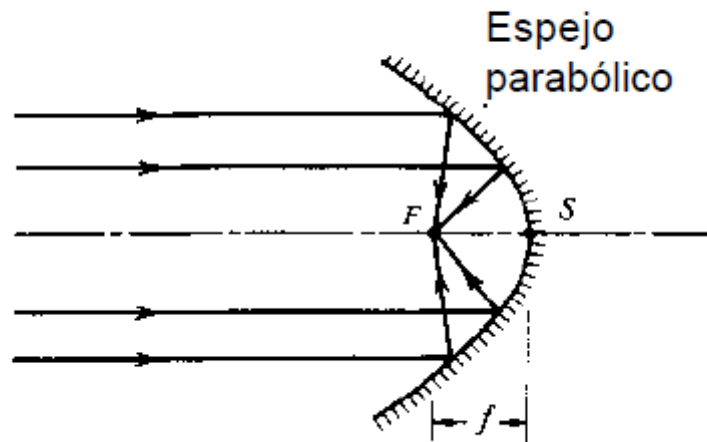


Figura 5.5: Espejo parabólico

5.2.7-ESPEJOS ELÍPTICOS

Un espejo elíptico refleja todos los rayos emitidos por uno de sus focos, P_1 , y los focaliza en el otro foco, P_2 . Para cualquier rayo la distancia recorrida entre P_1 y P_2 es la misma, sea cual sea el camino recorrido.

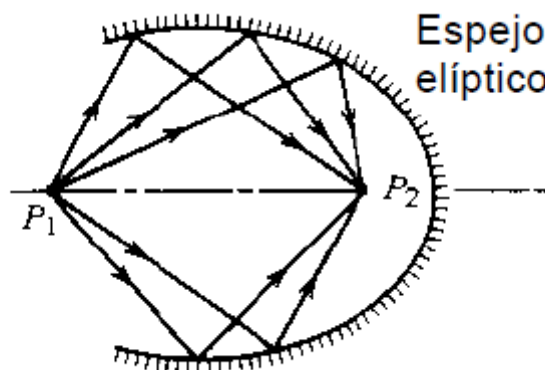


Figura 5.6: Espejo elíptico

5.2.8-ESPEJOS ESFÉRICOS

Los espejos esféricos son más sencillos de fabricar que los parabólicos o elípticos. Pero a diferencia de estos, no tienen propiedades de focalización, es decir, los rayos de luz incidentes sobre un espejo esférico no focalizan en un único punto. Dichos rayos paralelos que inciden y se reflejan en el espejo cortan al eje en puntos distintos. Sin embargo, para rayos muy próximos al eje sí que se cumple que los rayos reflejados focalizan en un punto F sobre el eje del espejo situado a $R/2$ de su centro C .

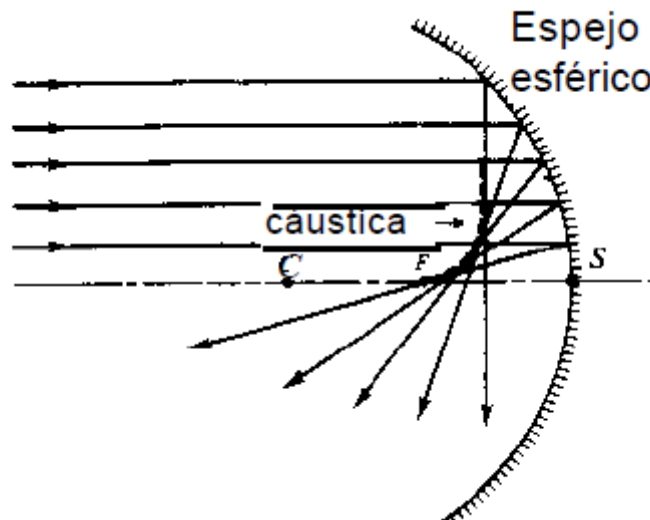


Figura 5.7: Espejo esférico

5.3-FORMULACIÓN MATRICIAL DE LA ÓPTICA GEOMÉTRICA

En la formulación matricial de la óptica geométrica, y en la aproximación paraxial, un rayo es determinado por su altura con respecto al eje óptico y por el ángulo que forma con dicho eje, θ . El sistema óptico formado puede describirse mediante una matriz 2x2 denominada matriz de transferencia.

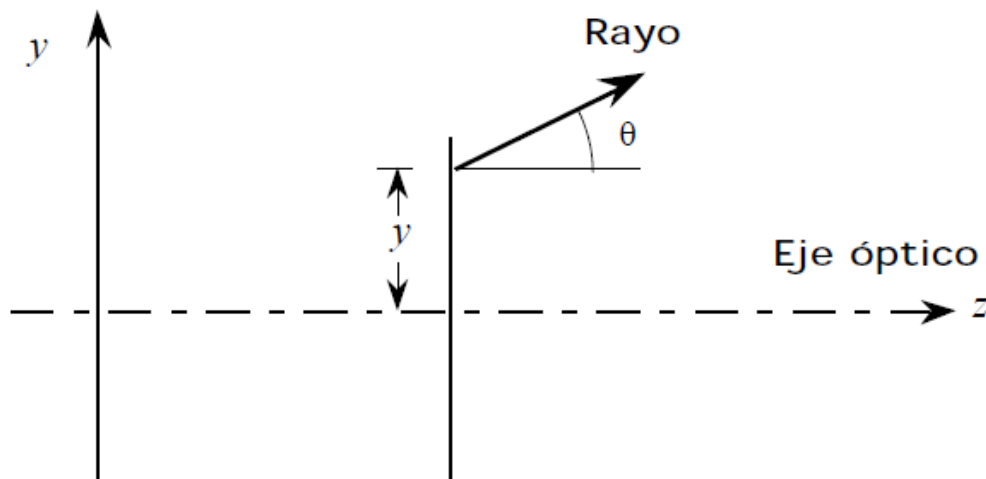


Figura 5.9

La utilización de matrices de transferencia facilita el cálculo dado que la matriz de transferencia de una sucesión de componentes ópticos o sistemas es el producto de las matrices de transferencia de cada uno de los componentes ópticos o sistema.

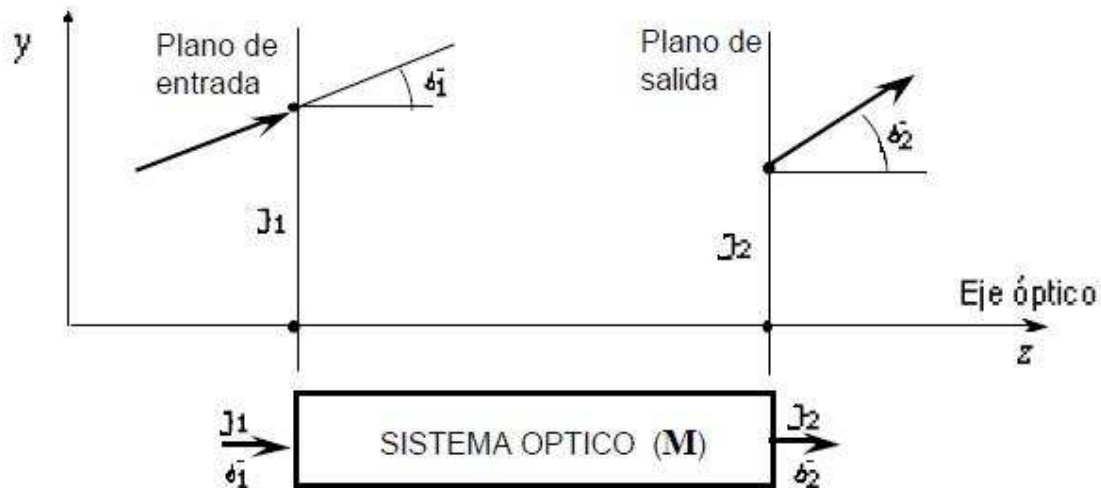


Figura 5.10

En la aproximación paraxial, cuando los ángulos son lo suficientemente pequeños para que se cumpla que $\sin \theta = \theta$ y $\tan \theta = \theta$, la relación entre (y_1, θ_1) y (y_2, θ_2) es lineal y puede escribirse como:

$$\begin{aligned} y_2 &= Ay_1 + B\theta_1 \\ \theta_2 &= Cy_1 + D\theta_1 \end{aligned} \quad (5.5)$$

Donde A, B, C y D son reales. Las ecuaciones anteriores pueden agruparse en una matriz 2x2 de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Teniendo como resultado que la matriz de transferencia se corresponde con:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Que permite calcular los valores de (y_2, θ_2) si se conocen (y_1, θ_1) .

5.3.1-PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

En el espacio libre se tiene que los rayos se comportan como líneas rectas dando lugar a las siguientes ecuaciones $y_2 = y_1 - \theta_1 d$, $\theta_2 = \theta_1$, y tales ecuaciones forman la matriz de traslación de la siguiente forma:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

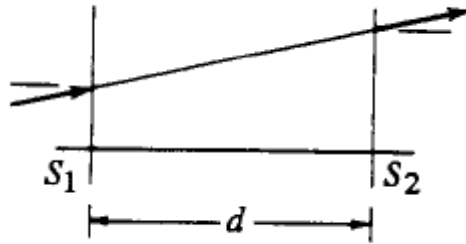


Figura 5.11: Propagación espacio libre

5.3.2-REFRACCIÓN EN UNA SUPERFICIE PLANA

En una superficie plana cuya misión es separar dos medios de diferentes índices de refracción, n_1 y n_2 , cuyos ángulos de refracción son θ_1 y θ_2 respectivamente, tenemos la siguiente relación $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, llamada Ley de Snell. Dicha ecuación puede reducirse a la siguiente $n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$ teniendo en cuenta la aproximación paraxial. Por tanto, para una superficie plana se tiene que la matriz de transferencia es la siguiente:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

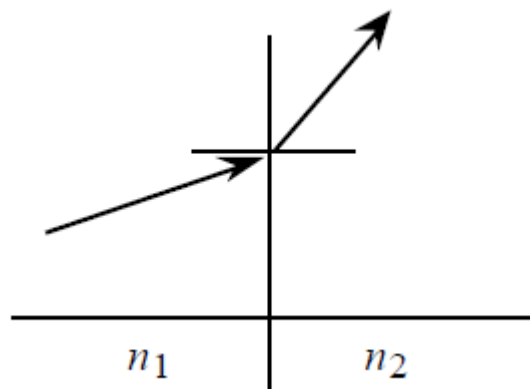


Figura 5.12: Refracción superficie plana

5.3.3-REFRACCIÓN EN UNA SUPERFICIE ESFÉRICA

En una superficie esférica los ángulos θ_1 y θ_2 de los rayos paraxiales refractados en ella se relacionan por medio de la siguiente ecuación:

$$\theta_2 = \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} y + \frac{n_1}{n_2} \theta_1 \quad (5.10)$$

Al tener que la altura del rayo no cambia se puede escribir la matriz de refracción como:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

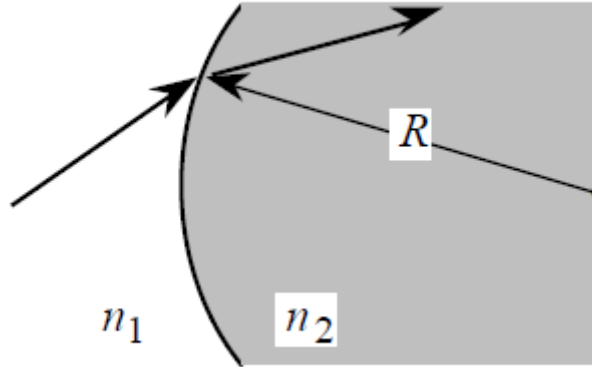


Figura 5.13: Refracción superficie esférica

5.3.4-REFLEXIÓN DE UN ESPEJO ESFERICO

De la siguiente ecuación

$$\theta_2 = \frac{2}{R}y - \theta_1 \quad (5.12)$$

Que relaciona los ángulos θ_1 y θ_2 en la aproximación paraxial para un espejo esférico y sabiendo que un rayo no cambia su altura, se tiene que

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{R} & -1 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

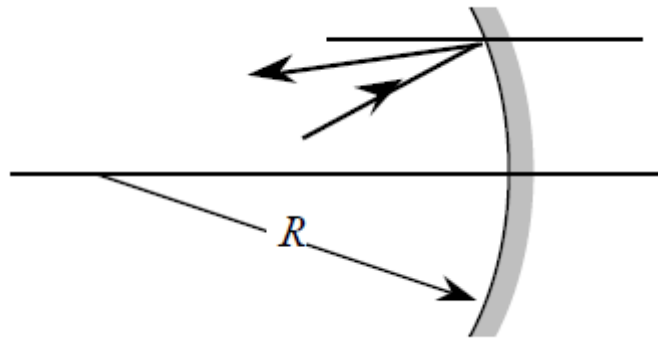


Figura 5.14: Reflexión espejo esférico

5.3.5-REFLEXIÓN EN UN ESPEJO PLANO

Al igual que en los casos anteriores, para un espejo plano la altura del rayo no cambia por lo que se mantiene que $y_2 = y_1$. De esta forma se obtendrá que $\theta_2 = -\theta_1$, así que la matriz de transferencia quedará definida de la siguiente manera:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

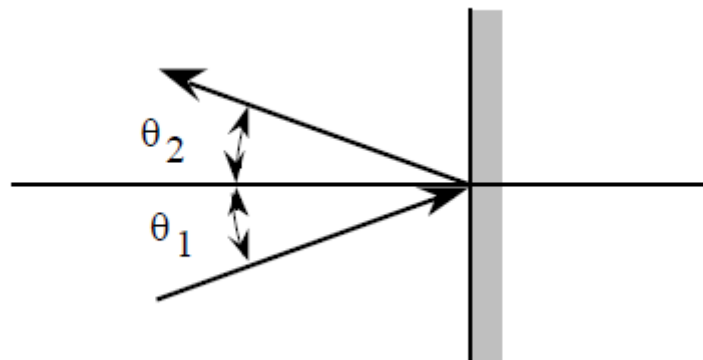


Figura 5.15: Reflexión espejo plano

5.3.6-TRANSMISIÓN A TRAVÉS DE UNA LENTE DELGADA

La relación de los ángulos θ_1 y θ_2 en una lente delgada viene dada por la siguiente ecuación:

$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{y}{f'} \quad (5.15)$$

Por lo que, teniendo en cuenta que la altura del rayo se mantiene constante, se puede definir la matriz de transferencia como:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

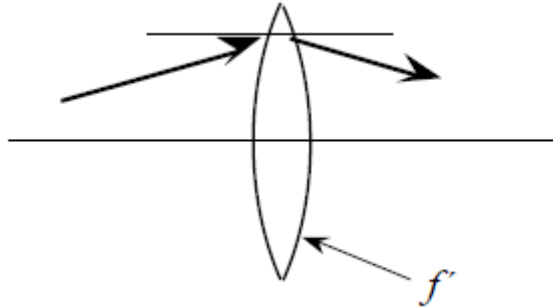


Figura 5.15: Transmisión lente delgada

5.3.7-MATRIZ DE UNA SUCESIÓN DE COMPONENTES ÓPTICOS

La matriz de una sucesión de componentes ópticos no será otra que una matriz compuesta por cada una de las matrices $M_1, M_2 \dots M_N$ de los componentes que forman el sistema completo. Por tanto la matriz de transferencia será:

$$M = M_N \dots \dots \dots M_2 M_1 \quad (5.17)$$

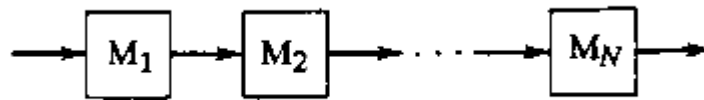


Figura 5.16: Matriz componentes ópticos



6-DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDIDA

Como se ha comentado anteriormente este proyecto trata sobre la realización y caracterización de un diseño cuasi-óptico de guiado electromagnético para la caracterización espectral de muestras. Para realizar tal diseño se ha tenido en cuenta tanto las características Gaussianas del haz que se tienen en el diseño así como las características geométrico-ópticas de los espejos que se van a utilizar para dicho diseño.

En primer lugar se va a plantear un diseño preliminar que consta de dos espejos. Como se ha visto anteriormente se tienen varios tipos de espejos que se podrían utilizar y teniendo en cuenta las propiedades de dichos espejos y las necesidades del diseño, se elige en primer lugar los espejos elípticos.

6.1-DISEÑO INICIAL

Como se ha explicado anteriormente un espejo elíptico tiene unas propiedades muy útiles si como en este caso, se quiere diseñar un sistema de medida que permita enfocar y poder conseguir medir zonas más pequeñas del material de interés en cada caso.

Lo primero que hay que tener en cuenta es la posición en la que se quieren medir las muestras una vez que se tenga el diseño completo. Existen dos opciones, se puede medir en posición horizontal o vertical, pero dado que colocar las muestras en horizontal resulta más sencillo se va a elegir el siguiente diseño:

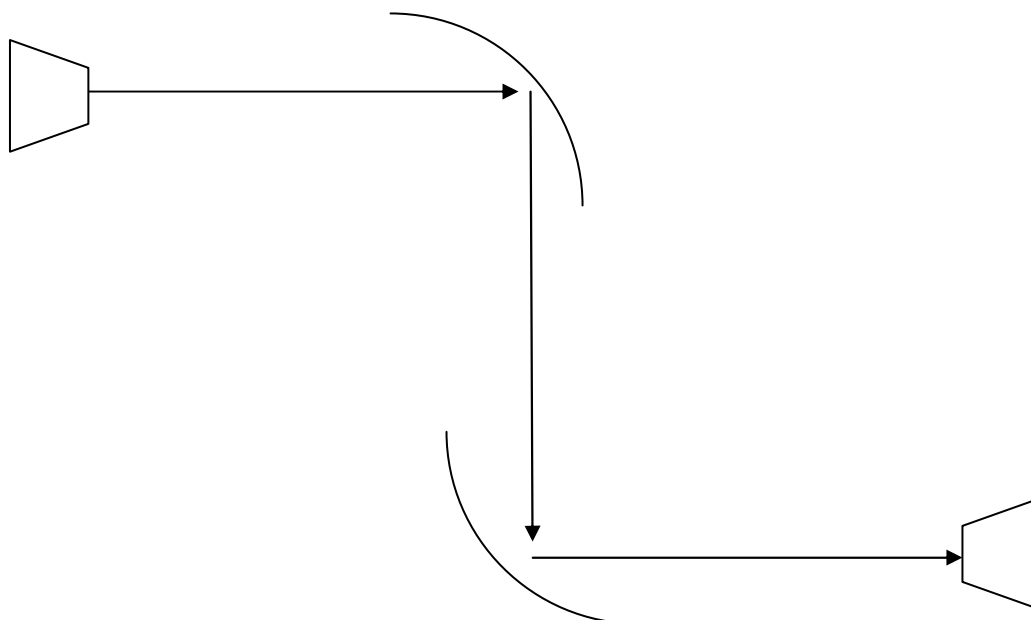
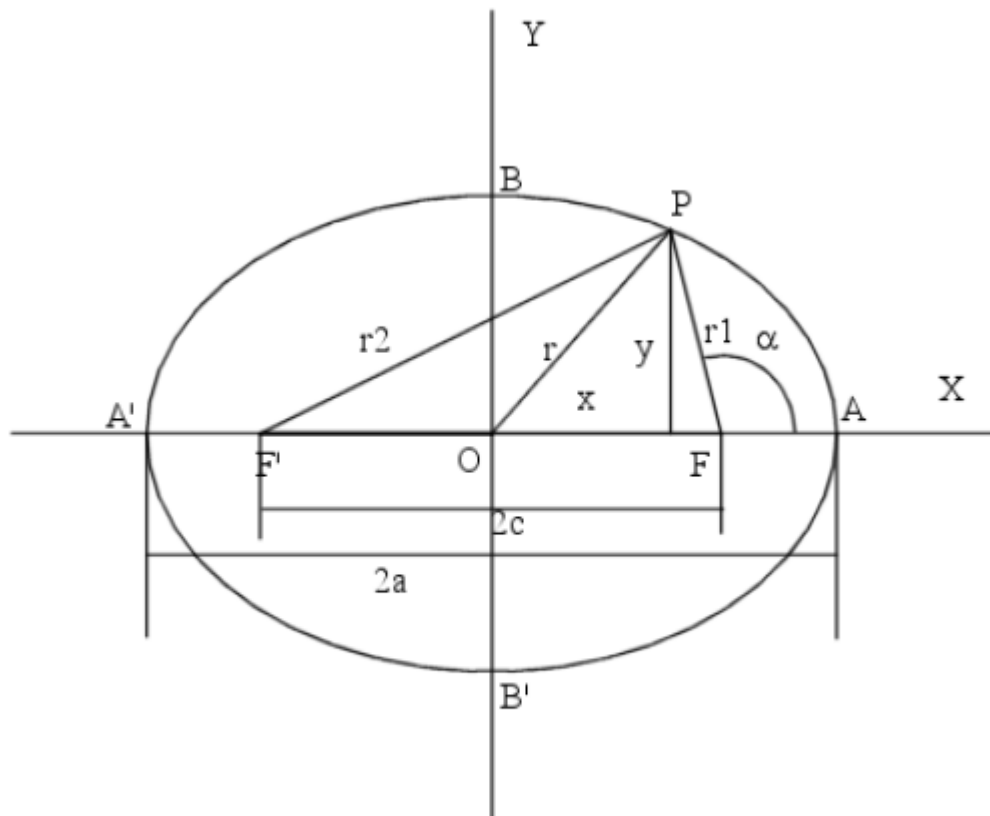


Figura 6.1 Diseño de un sistema de medida con dos espejos elípticos. Se muestra también la antena emisora y receptora.

Dado que se van a utilizar espejos elípticos en primer lugar, se debe conocer muy bien las características de dichos espejos. Para ello se va a explicar a continuación la geometría de la elipse y como se puede realizar el diseño de dichos espejos.

6.1.1-GEOMETRÍA DE LA ELIPSE

Una elipse se define de la siguiente manera:



Elipse en coordenadas polares

Figura 6.2: Geometría elipse

Siendo O el centro de simetría de la elipse. Dicho centro también representa el origen del sistema cartesiano cuyos ejes son los ejes de la elipse. El parámetro a equivale a la longitud OA del semieje mayor, y el parámetro b a la distancia OB del semieje menor.

F y F' representan los focos de la elipse y $P(x, y)$ es un punto genérico de la elipse. Por tanto, se tiene que la distancia de uno de los focos, F , a un punto genérico, P , viene dada por r_1 ; y la distancia PF' será r_2 .

Por tanto, una vez que se tiene bien definida la elipse con todos sus parámetros se puede pasar a definir las ecuaciones que la caracterizan.

En toda elipse se verifica que



$$r_1 + r_2 = 2a \quad (6.1)$$

De esta ecuación se puede concluir que la suma de los caminos de cualquier rayo que vaya de un foco F , pasando por un punto genérico P , al otro foco F' , es constante y es igual al valor del eje mayor de la elipse.

Se puede definir la ecuación cartesiana de la elipse teniendo en cuenta que

$$\begin{aligned} r_1 + r_2 &= 2a \\ r_2 - r_1 &= \sqrt{(x+c)^2 + y^2} - \sqrt{(x-c)^2 + y^2} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Y despejando de ambas ecuaciones se puede conseguir

$$r_2 = \frac{c}{a}x + a \quad r_1 = a - \frac{c}{a}x \quad (6.3)$$

Por tanto, teniendo en cuenta el valor de r_1 y por otra parte que $r_1^2 = (x-c)^2 + y^2$, eliminando r_1 resulta $\left(a - \frac{c}{a}x\right)^2 = (x-c)^2 + y^2$, y se llega tras realizar algunas operaciones a $a^2 - c^2 = \left(1 - \frac{c^2}{a^2}\right)x^2 + y^2$ y como por el Teorema de Pitágoras se sabe que $b^2 = a^2 - c^2$ entonces $b^2 = \frac{b^2}{a^2}x^2 + y^2$ y por tanto la ecuación cartesiana de la elipse es la siguiente:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (6.4)$$

Ya se ha definido la elipse y sus ecuaciones básicas pero ahora es necesario plantearse el diseño inicial de nuevo.

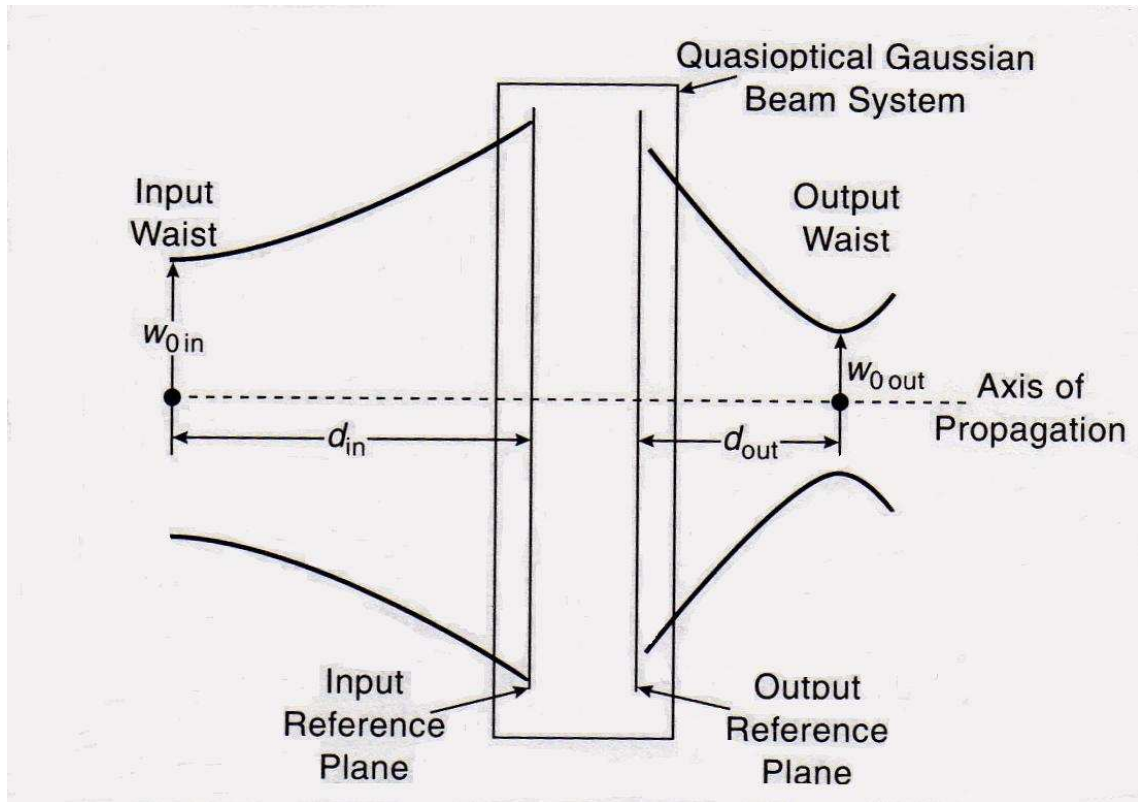


Figura 6.3: Transformación del haz Gaussiano por un sistema cuasi-óptico caracterizado por su matriz ABCD

Como se aprecia en la figura 6.3 hay diferentes parámetros a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño. En primer lugar hay que tener en mente que se tiene unos parámetros de entrada como son w_{0in} y d_{in} . Dependiendo del valor de estos parámetros se tendrán unos valores para los parámetros de salida u otros.

Se tienen inicialmente los siguientes datos:

La frecuencia de trabajo con la que inicialmente se va a trabajar es una frecuencia en el rango de los Gigahercios. Según las características que se tiene en mente que tenga el diseño se toma un valor inicial para $d_{in} = 0.4 \text{ m}$ e igual a d_{out} ya que se desea que el diseño no sea muy grande. Se toma dicho valor debido a que se quiere que el diseño trabaje en campo lejano. Por tanto deberá cumplirse que:

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (6.5)$$

Siendo D el diámetro de la antena y r la distancia desde el punto de radiación hasta el punto de medición arbitrario, es decir, d_{in} .

Para una frecuencia inicial de 60 GHz y para un valor dado por las características de la antena del laboratorio de $D = 6\lambda$ se tiene:

$$r \geq 0.36 \text{ m}$$

Por lo que se aproxima este valor por $r=0.4$ m. También viene fijado el valor de ω_{0in} por las características de la antena del laboratorio y tiene un valor de $\omega_{0in} = 1.9\lambda$.

Se sabe, por la teoría explicada en apartados anteriores, que un sistema cuasi-óptico cumple la siguiente ecuación:

$$\omega_{out} = \frac{\omega_{0in}}{[(Cd_{in} + D)^2 + C^2 z_c^2]^{0.5}} \quad (6.6)$$

Y conociendo que para un espejo fino elíptico se tiene la siguiente matriz de transferencia:

$$M_{elíptica} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.7)$$

Siendo R_1 y R_2 d_{in} y d_{out} respectivamente.

Se puede crear una función en Matlab que calcule los datos requeridos de la siguiente forma:

```
function[wo_out]=wo(f,din,n)
lambda=300000000/f
wo_in=1.9*lambda
D=1;
zc=pi*wo_in^2/lambda
dout=n*din
C=-(din+dout)/(din*dout);
wo_out=wo_in/((C*din+D)^2+C^2*zc^2)^0.5
```

Se tienen como parámetros de entrada de la función $f=frecuencia$, d_{in} un valor que cumpla que se encuentra en campo lejano, por ejemplo, $d_{in} = 0.4$ m; y $n = \frac{d_{in}}{d_{out}}$. Por tanto, para una primera ejecución a modo de prueba y para dos tipos de frecuencia como son $f=60$ GHz y $f=90$ GHz, se tienen los siguientes resultados, en función de n :

d_{in} (m)	n	d_{out} (m)	F(GHz)	λ (m)	ω_{0in} (m)	z_c	ω_{0out} (m)
0.4	3	1.2000	60	0.0050	0.0095	0.0567	0.0248
0.4	2.5	1	60	0.0050	0.0095	0.0567	0.0213
0.4	2	0.8000	60	0.0050	0.0095	0.0567	0.0175
0.4	1.5	0.6000	60	0.0050	0.0095	0.0567	0.0134
0.4	1	0.4000	60	0.0050	0.0095	0.0567	0.0091
0.4	0.5	0.2000	60	0.0050	0.0095	0.0567	0.0046

TABLA 6.1: Cálculo parámetros diseño para $f=60$ GHz

d_{in} (m)	n	d_{out} (m)	F(GHz)	λ (m)	$\omega_{0 in}$ (m)	z_c	$\omega_{0 out}$ (m)
0.4	3	1.2000	90	0.0033	0.0063	0.0378	0.0178
0.4	2.5	1	90	0.0033	0.0063	0.0378	0.0150
0.4	2	0.8000	90	0.0033	0.0063	0.0378	0.0122
0.4	1.5	0.6000	90	0.0033	0.0063	0.0378	0.0092
0.4	1	0.4000	90	0.0033	0.0063	0.0378	0.0062
0.4	0.5	0.2000	90	0.0033	0.0063	0.0378	0.0031

TABLA 6.2: Cálculo parámetros diseño para $f=90$ GHz

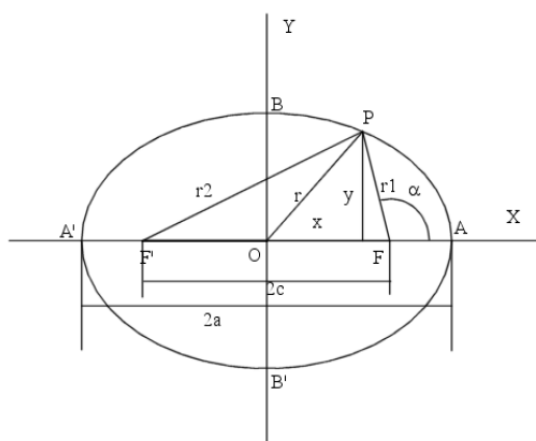
Se observa que los valores de $\omega_{0 out}$ son pequeños y que dichos valores disminuyen al disminuir el valor de d_{out} .

Una vez hecho un primer análisis es necesario que se decidan algunos de los parámetros clave para llegar a un diseño adecuado. En primer lugar, se va a tomar como frecuencia de diseño 90 GHz ya que con 60 GHz los tamaños de los espejos son demasiado grandes. Con la frecuencia de 90 GHz se tienen valores de $\omega_{0 out}$ más bajos por lo que la resolución con la que se podrán medir muestras con el diseño será mejor. También se van a tomar distintos valores de n (1,2 y 3) para comprobar cuál es más adecuado para dicho diseño.

Se ha de tener en cuenta que este diseño tiene que tener unas dimensiones máximas ya que la función final de este proyecto será construir el sistema y utilizarlo para medida de muestras en el rango de los terahercios. Por este motivo no se puede diseñar un diseño excesivamente grande. También se puede tener en cuenta que este diseño tiene como frecuencia de trabajo 90 GHz pero se sabe que si dicho diseño funciona correctamente a esa frecuencia también trabajará a frecuencias mayores, como se verá más adelante.

Teniendo ya estos valores fijados se va a proceder a calcular los valores que serían necesarios para los espejos. Se ha de tener en cuenta que los espejos son elípticos, es decir, que los espejos que se utilicen en el diseño serán porciones de elipses. Por este motivo, es necesario calcular los parámetros que tendrían dichas elipses si queremos que se cumplan las características señaladas anteriormente. Por tanto, se utilizará de nuevo una función de Matlab para realizar los cálculos con mayor sencillez y rapidez.

Como se ha visto anteriormente en una elipse se tiene que:



PARÁMETROS DE LA ELIPSE

Eje mayor = $2a$

Eje menor = $2b$

El eje mayor también se puede definir como:

Eje mayor = $r_1 + r_2$

Distancia focal = $2c$

Elipse en coordenadas polares

Figura 6.4: Parámetros elipse

Para calcular la distancia focal en función de los semiejes a y b se tendrá que partir de una hipótesis trigonométrica.

Si se tiene un triángulo con dos lados conocidos ($R_1 = d_{in}$ y $R_2 = d_{out}$) y el ángulo que forman, se podrá calcular a partir de ello la distancia focal. Por tanto, se partirá del siguiente resultado para realizar los sucesivos cálculos:

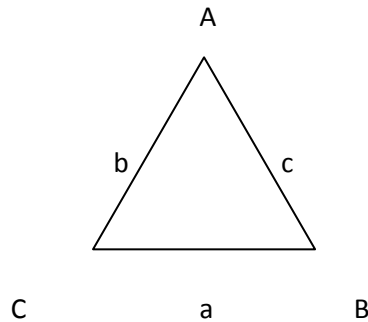


Figura 6.5: Geometría triángulo

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos C} \quad (6.8)$$

$$\sin B = \frac{b \sin C}{c} \quad (6.9)$$

$$A = 180 - B - C \quad (6.10)$$

De esta forma, se tienen ya definidos todos los parámetros necesarios para el cálculo de la elipse requerida para nuestro diseño inicial. Por tanto, la función de Matlab que se utilizará es la siguiente:

```
function[elipse]=elipse(din,n,alfa)
dout=n*din;
r1=din;
r2=dout;
eje_mayor=r1+r2
distancia_focal=(din^2+dout^2-2*din*dout*cos(alfa))^0.5
c=distancia_focal/2;
a=eje_mayor/2;
b=(a^2-c^2)^0.5;
eje_menor=2*b
senF1=r2*sin(alfa)/distancia_focal;
F1=asin(senF1)*360/(2*pi)
F2=180-alfa-F1
```



Esta función, no solo calcula los parámetros de la elipse como son el eje mayor, eje menor y la distancia focal, sino que también da como resultado el ángulo que se forma en cada uno de los focos (F1 y F2).

Los parámetros de entrada en este caso siguen siendo la frecuencia de trabajo del sistema y el parámetro n que relaciona d_{in} con d_{out} , pero además aparece un nuevo parámetro llamado alfa que se corresponde con uno de los ángulos del triángulo que forman r_1 , r_2 y la distancia focal. Dicho ángulo es el formado bajo el punto de la elipse donde se cortan r_1 , r_2 .

Gracias a las aproximaciones y deducciones anteriores se pueden calcular por tanto, para distintos valores de n , los parámetros que faltan para el diseño teórico del espejo elíptico.

Teniendo como valor de muestra $d_{in} = 0.4 \text{ m}$ y para $n=1,2$ y 3 respectivamente, se tienen los siguientes resultados variando el ángulo alfa:

$d_{in} \text{ (m)}$	n	$d_{out} \text{ (m)}$	alfa	Eje mayor(m)	Eje menor(m)	Distancia focal	F1	F2
0.4	1	0.4	120	0.8000	0.4000	0.6928	30.0000	30.0000
0.4	1	0.4	90	0.8000	0.5657	0.5657	45.0000	45.0000
0.4	1	0.4	80	0.8000	0.6128	0.5142	50.0000	50.0000
0.4	1	0.4	70	0.8000	0.6553	0.4589	55.0000	55.0000
0.4	1	0.4	60	0.8000	0.6928	0.4000	60.0000	60.0000
0.4	1	0.4	50	0.8000	0.7250	0.3381	65.0000	65.0000
0.4	1	0.4	40	0.8000	0.7518	0.2736	70.0000	70.0000

TABLA 6.3: Cálculo parámetros elipse para $n=1$

$d_{in} \text{ (m)}$	n	$d_{out} \text{ (m)}$	alfa	Eje mayor(m)	Eje menor(m)	Distancia focal	F1	F2
0.4	2	0.8000	90	1.2000	0.8000	0.8944	63.4349	26.5651
0.4	2	0.8000	80	1.2000	0.8667	0.8300	71.6655	28.3345
0.4	2	0.8000	70	1.2000	0.9268	0.7623	80.4568	29.5432
0.4	2	0.8000	60	1.2000	0.9798	0.6928	90	30
0.4	2	0.8000	50	1.2000	1.0254	0.6234	79.4415	50.5585
0.4	2	0.8000	40	1.2000	1.0631	0.5565	67.5157	72.4843

TABLA 6.4: Cálculo parámetros elipse para $n=2$

d_{in} (m)	n	d_{out} (m)	alfa	Eje mayor(m)	Eje menor(m)	Distancia focal	F1	F2
0.4	3	1.2000	90	1.6000	0.9798	1.2649	71.5651	18.4349
0.4	3	1.2000	80	1.6000	1.0615	1.1972	80.7897	19.2103
0.4	3	1.2000	70	1.6000	1.1351	1.1277	89.4704	20.5296
0.4	3	1.2000	60	1.6000	1.2000	1.0583	79.1066	40.8934
0.4	3	1.2000	50	1.6000	1.2558	0.9914	68.0031	61.9969
0.4	3	1.2000	40	1.6000	1.3021	0.9298	56.0524	83.9476

TABLA 6.5: Cálculo parámetros elipse para n=3

A partir de estos resultados se puede decidir que la mejor elección para n y para α sería tener $n=1$ y $\alpha=90^\circ$ ya que los resultados son muy aconsejables y se ajustan muy bien a las características deseadas. Es decir, los valores geométricos de la elipse se ajustan bien al tamaño requerido.

A pesar de esto el valor inicial tomado para d_{in} es demasiado grande para la frecuencia de trabajo elegida, por este motivo se reducirá su valor a pesar de que de ese modo no se va a trabajar en campo lejano, ya que si se tienen en cuenta diseños que se van a realizar posteriormente, como por ejemplo un diseño que conste de cuatro espejos, el tamaño ocupado por dicho diseño será demasiado extenso. Por este motivo se baja el valor de d_{in} de 0.4 a 0.15 metros.

Recapitulando, se tiene que los valores aceptados finalmente son:

$$d_{in} = d_{out} = 0.15 \text{ m}$$

$$f = 90 \text{ GHz}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

Y por tanto los resultados teóricos obtenidos para el diseño con dos espejos son:

$d_{in} = 0.15 \text{ m}$
$n = 1$
$d_{out} = 0.15 \text{ m}$
$f(\text{GHz}) = 90$
$\lambda = 0.0033 \text{ m}$
$\omega_{oin} = 0.0063 \text{ m}$
$z_c = 0.0378$
$\omega_{out} = 0.0057 \text{ m}$

Valores para la elipse:

$d_{in} = 0.15\text{m}$
$d_{out} = 0.15\text{m}$
$\alpha = 90^\circ$
Eje_mayor = 0.30m
Eje_menor = 0.212132m
Distancia_focal = 0.212132m
F1 = 45°
F2 = 45°

Para el análisis del sistema se va a utilizar un programa llamado GRASP_8W. GRASP_8W de TICRA es un software destinado al diseño, análisis, síntesis y técnicas de medida para antenas.

En GRASP se introducirán los valores del reflector utilizado para el diseño, la frecuencia de trabajo, el tipo de antena utilizado con sus características y los distintos ejes de coordenadas de cada elemento así como otros muchos. Algunos de los datos más importantes introducidos en dicho programa son:

Objetos geométricos

Scatterer: Reflector → Dentro de este apartado los datos más importantes son el “coordinate_system” utilizado, el “surface” y el “rim”. Dichos valores serán definidos más adelante.

Surface: “Ellipsoid” → Aquí habrá que tener en cuenta el “vertex_distance”, “foci_distance” y “axis_angle”. Siendo sus valores respectivamente 0.3 m, 0.2121 m y -90° . Se introduce un valor de axis_angle = -90° para que cuando GRASP_8W corte la parte deseada de elipse quede orientada en la posición adecuada.

Rim: “Elliptical Rim” → Los parámetros introducidos en este apartado son “centre(x,y)”, “rotation” y “half_axis(x,y)”. Sus respectivos valores son (0.10605, 0) metros, 0 y (0.10, 0.07) metros. El valor elegido para el “half_axis” se explicará más adelante, ya que dicho valor se ha elegido teniendo en cuenta el spill-over ya que se corresponde con el tamaño del reflector.

Coordinate_system → Se crearán diferentes sistemas de coordenadas para cada elemento, como son el sistema de coordenadas para la antena emisora, el sistema de coordenadas para cada uno de los reflectores y otros sistemas de coordenadas de los que se hablará más adelante.

Objetos eléctricos

Frequency → El único parámetro que se debe introducir aquí es el valor de la frecuencia. En este caso es 90 GHz.



Source: Feed→ En este apartado se define la fuente, es decir, la antena emisora. Los parámetros a tener en cuenta son “*coord_sys*”, “*feed_definition*” y “*frequency*”.

Standard_po→ Se define esto para poder realizar la ejecución del programa y conseguir los resultados del diseño realizado. El apartado más importante es el “*Po_points* (*po1*, *po2*)” y el valor que se le ha dado es (150, 200) puntos.

Feed_definition: Gaussian Feed→ En este caso definiremos una antena con diagrama de radiación Gaussiano y los parámetros que debemos establecer son principalmente “*taper_angle*” y “*taper*”. Para ello se deben tener en cuenta las características de un haz Gaussiano, para ello se utilizará la siguiente fórmula:

$$\theta_0 \cong \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (6.11)$$

Sustituyendo en la ecuación los valores correspondientes tenemos que $\theta_0 = 0.1675 \text{ rad} = 9.59^\circ$ por tanto se toma que para -3 dB se tienen 10° . De modo que “*taper_angle*” y “*taper*” son 10° y -3 dB respectivamente.

Tabulated Feed→ Este tipo de Antena se utilizará también para realizar un diseño con las características de una antena real. Se hablará de ello más adelante.

Field Storage: Spherical Cut→ Con esto se crea un corte esférico que servirá, en el apartado de resultado de esta memoria, para analizar el diagrama de radiación del sistema y el “*spill-over*”. Los parámetros más importantes de este apartado son “*theta_range*” y “*phi_range*”. En él se pondrá el rango de ambos ángulos teniendo en cuenta el comienzo, final y el número de puntos. Sus valores respectivamente son (0, 360, 361) y (0, 90, 3) para “*theta_range*” y “*phi_range*”.

Plane Cut→ En este caso se trata de un corte plano que se colocará tanto en el lugar de medida de la futura muestra como a la salida del sistema principalmente, y mostrarán la forma del haz en dichos puntos. De esto se hablará posteriormente. Los parámetros más destacables son en este caso “*rho_range*” y “*phi_range*” y sus valores son para “*phi_range*” (0, 360, 361) al igual que para el Spherical Cut, y variable dependiendo del diseño y la frecuencia para el “*rho_range*”.

Objetos de diseño

Es necesario definir algunos de estos parámetros para una buena ejecución del programa y para conseguir una visualización del diseño realizado. Los parámetros que habría que definir para conseguir esto son: “*Coordinate_plot*”, “*3D_plot*”, “*Feed_plot*”, “*Ray_plot*” y “*Reflector_plot*”.

Una vez introducidos todos estos parámetros en GRASP y algunos otros de menor importancia de los que no se ha hablado en profundidad, se dibujará en dicho programa el diseño realizado. Posteriormente se ejecutará el programa y se obtendrán los resultados pero de ello se hablará más detenidamente en el apartado de Resultados de la memoria.

6.1.2-DISEÑO DOS ESPEJOS ELÍPTICOS

Después de realizar todo lo indicado anteriormente se obtendrá de GRASP el siguiente diseño de dos espejos elípticos:

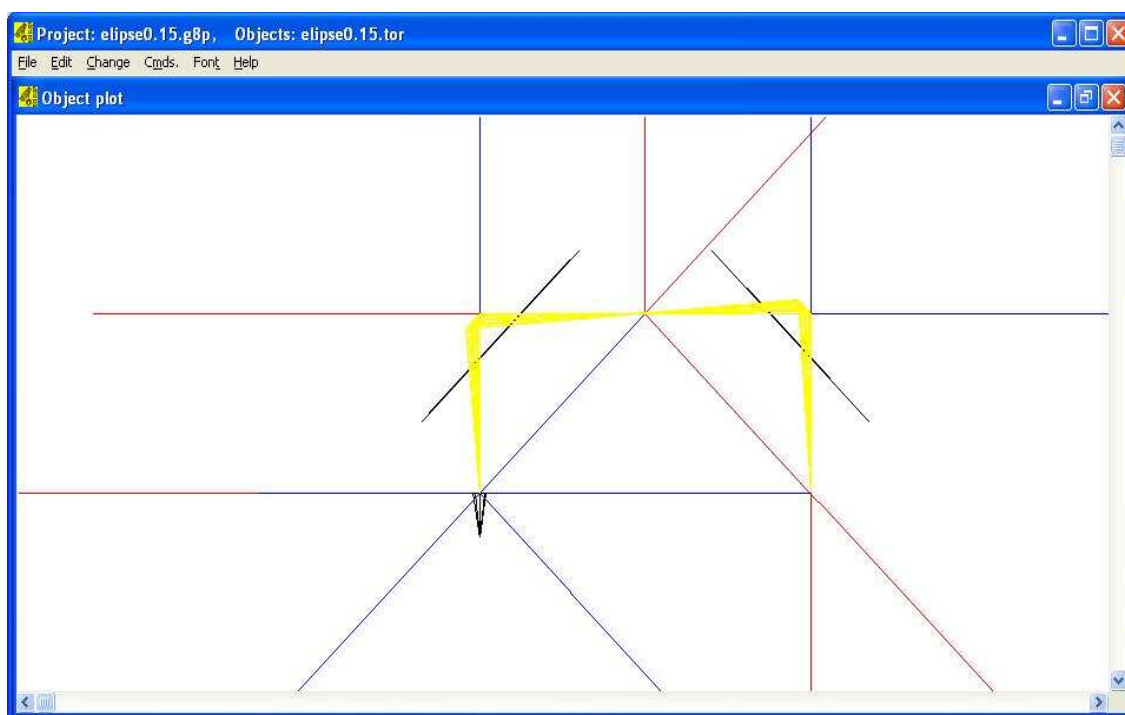


Figura 6.6: Diseño dos espejos elíptico es GRASP

En este diseño se puede apreciar la antena emisora, los dos espejos elípticos y el rayo que va desde la antena y se refleja en ambos espejos. Como se observa en el centro situado entre ambos espejos existe una focalización. Esto es lo que se estaba buscando al utilizar espejos elípticos por lo que se puede concluir que el diseño inicial que se ha realizado es correcto y cumple las expectativas de partida. Respecto a los resultados, como ya se ha dicho anteriormente, se analizará más tarde.

Este diseño preliminar ha permitido tener claro todos los valores de los espejos, así como la distancia de separación entre ellos y las características básicas del diseño. El objetivo de este proyecto es el diseño y caracterización de un sistema cuasi-óptico para medida de muestras. Dicho proyecto va a constar básicamente de dos diseños. Uno de ellos estará destinado a la medición de partes pequeñas de muestras, es decir, será necesario enfocar en una zona lo más

reducida posible. El otro diseño por el contrario, estará destinado a medir zonas más grandes y no se necesitará enfocar sino que se medirá una parte mayor de la muestra.

Por este motivo, emplearemos dos tipos de espejos diferentes. Como se ha visto anteriormente existen muchos tipos de espejos pero este proyecto se va a centrar únicamente en dos: los espejos elípticos que permiten el enfoque en una zona reducida, y los espejos parabólicos que mantienen el tamaño del haz en una zona mayor de la muestra.

A continuación se van a explicar los dos diseños básicos de este proyecto, con sus correspondientes características. No solo se va a centrar este diseño en la frecuencia elegida anteriormente, 90 GHz, sino que se va a realizar un diseño con unas propiedades mucho más amplias, es decir, se intentará que el diseño pueda trabajar a distintas frecuencias de trabajo sin perder la funcionalidad deseada. 90 GHz será la frecuencia mínima de diseño. Asegurando que el sistema cuasi-óptico funciona a esta frecuencia, el sistema será válido a frecuencias mayores.

6.2-DISEÑO CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS

Este diseño con cuatro espejos se basa en el diseño inicial del que se ha hablado anteriormente. Las características que se desean son las mismas que antes solo que ahora lo que se pretende conseguir es que se enfoque más que antes, es decir que $\omega_{0\ out}$ después del segundo espejo, es decir, en el centro del sistema, sea aun más pequeño. Por lo que el diseño quedaría como se muestra en la siguiente figura:

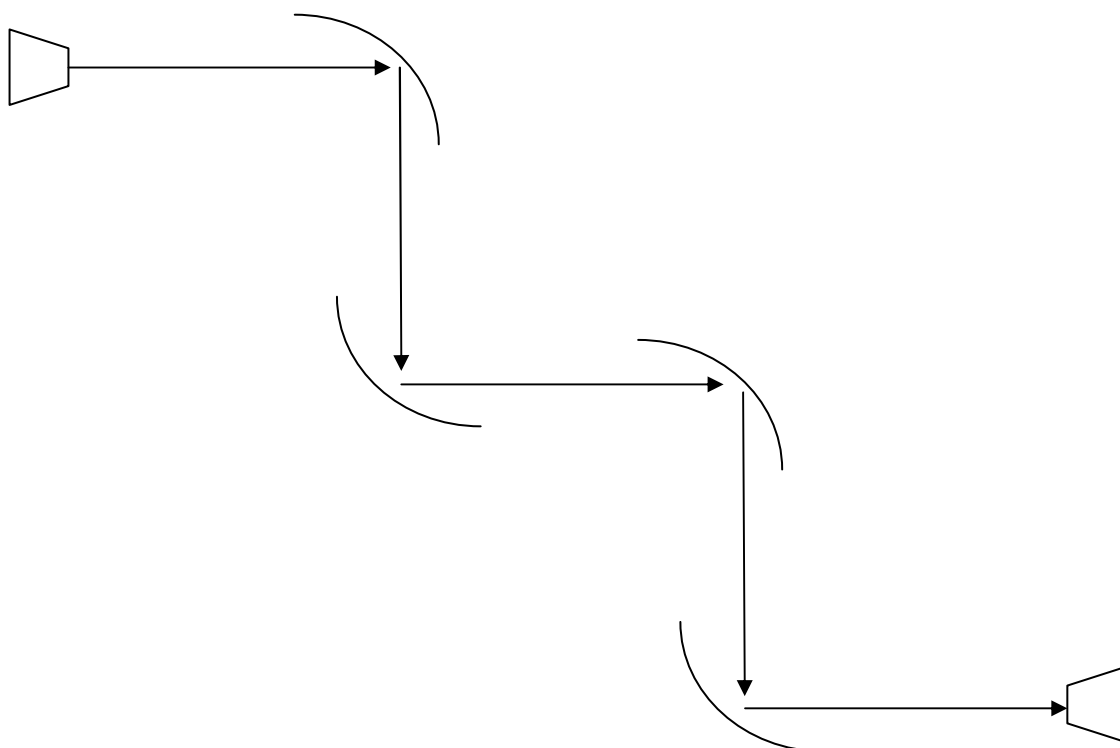


Figura 6.7 Diseño de un sistema de medida con cuatro espejos elípticos. Se muestra también la antena emisora y receptora.

Como ya se ha explicado la función de este diseño es enfocar y poder medir muestras con mayor precisión y fragmentos de menor tamaño. Por este motivo se eligen los espejos elípticos, estos permiten, en función de su curvatura, enfocar el haz en un $\omega_{0\ out}$ pequeño. Se usan cuatro espejos en lugar de dos porque nos da más posibilidades en el diseño de seleccionar un $\omega_{0\ out}$ en el centro más pequeño.

Anteriormente se ha descrito que un espejo elíptico tiene la característica de que los rayos que van de uno de sus focos, F_1 , y se reflejan en la superficie de la elipse, va a pasar siempre por el otro foco, F_2 . Esto se ilustra muy bien en la siguiente imagen:

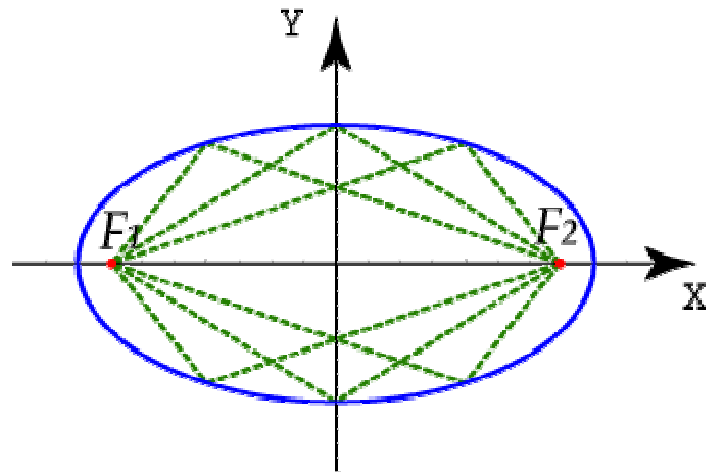


Figura 6.8: Recorrido del un haz en una elipse

Gracias a esta característica se va a tener definida la colocación de los espejos una vez que tengan las medidas de las elipses a las que pertenecen los espejos. Es decir, para que se cumpla que el rayo vaya de la antena a reflejarse en el primer espejo y del primero al segundo, y así sucesivamente hasta llegar a la antena receptora, va a ser necesario colocar cada elemento de la siguiente manera:

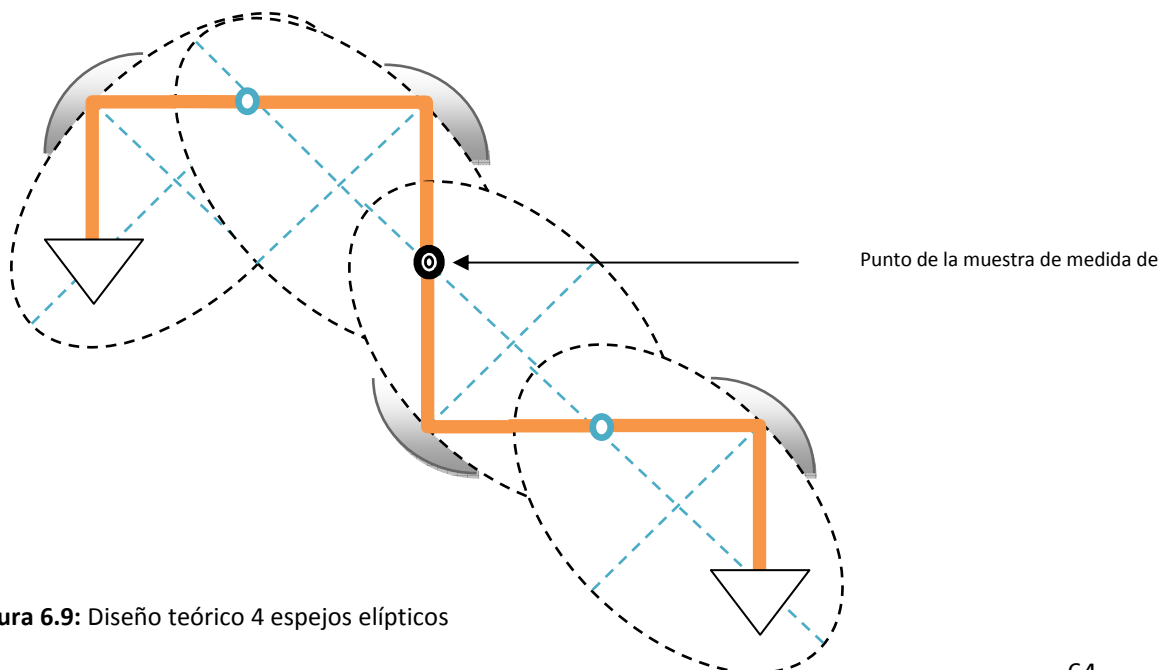


Figura 6.9: Diseño teórico 4 espejos elípticos

Como se ve en el dibujo las antenas emisora y receptora están situadas en el foco F_1 de la primera elipse y en F_2 de la última elipse respectivamente. El punto de medida de $\omega_{0\ out}$ se encuentra justo en el foco F_2 de la segunda elipse que coincide con F_1 de la tercera elipse. De este dibujo se puede apreciar que los focos de la elipses son coincidentes uno a uno con la siguiente elipse. Se hace esto para que los rayos reflejen en cada uno de los espejos y se consiga enfocar en el centro del diseño. Hay otros dos puntos de focalización que son los marcados con un círculo azul, pero el que interesa es el punto central marcado con un círculo negro.

Una vez hecho el diseño teórico y teniendo en cuenta los datos obtenidos del diseño inicial se podría pasar a realizar el diseño en GRASP. Se tiene que la frecuencia elegida para el diseño es 90 GHz. También se tienen otros datos como son $d_{in} = d_{out} = 0.15\ m$ y $\alpha = 90^\circ$. Para los demás datos a introducir en GRASP se tomarán los mismos que los del diseño inicial ya que este segundo diseño está basado en el anterior.

Por tanto el esquema que se obtendría después de introducir todos los datos a GRASP es el siguiente:

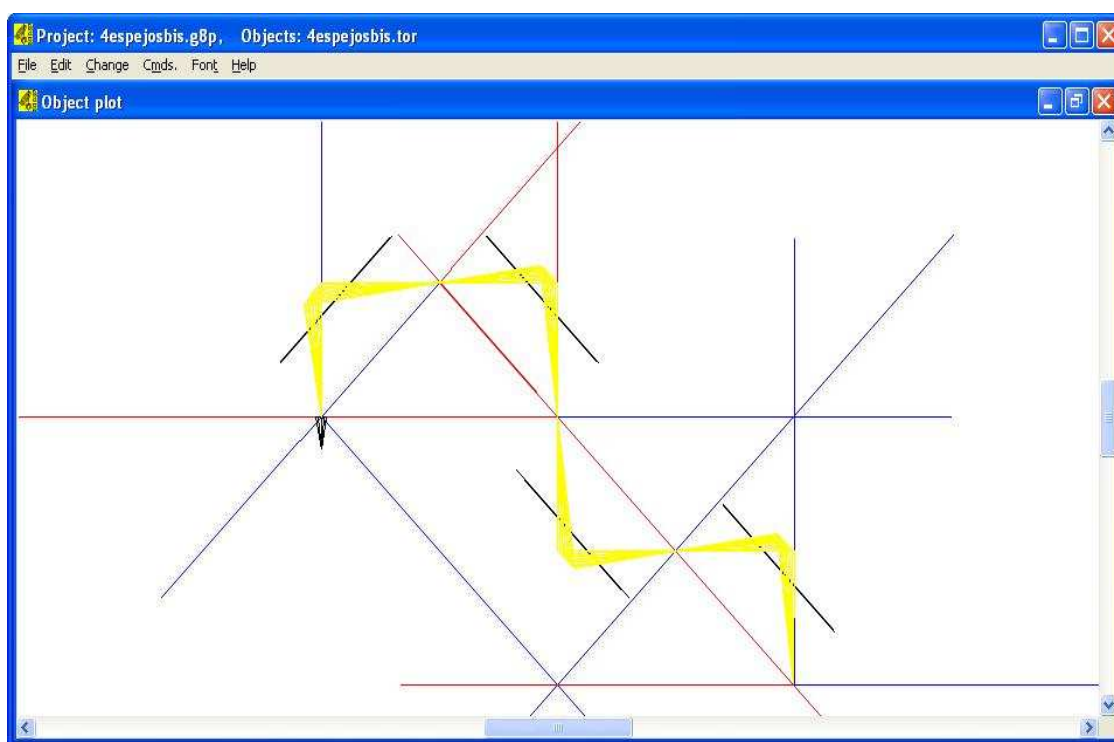


Figura 6.10: Diseño 4 espejos elípticos en GRASP

Como se aprecia en el diseño anterior, en éste también se aprecian la antena emisora y los espejos, que en este caso son cuatro. En esta imagen se puede ver muy bien lo que se ha comentado antes de que existen tres puntos de focalización. El que es de interés es el situado en el centro del sistema ya que es ahí donde se colocarán las muestras para ser medidas. En este caso el recorrido que hace el rayo es mayor ya que se cuenta con 4 espejos, por tanto también se puede deducir que el valor obtenido para $\omega_{0\ out}$ será menor. Esto se debe a que al

tener 4 espejos se consigue una mayor focalización, ya que por cada uno de los espejos en los que se refleje el rayo aplicaremos la siguiente ecuación vista antes:

$$\omega_{out} = \frac{\omega_{in}}{[(Cd_{in} + D)^2 + C^2 z_c^2]^{0.5}} \quad (6.12)$$

Sabiendo que ω_{in} de entrada viene dado por las características de la antena del laboratorio y su valor es $\omega_{in} = 1.9\lambda$, podremos calcular el valor de ω_{out} en cada uno de los puntos de focalización.

Para el primer punto de focalización tendremos que $\omega_{in} = 1.9\lambda = 0.0063 \text{ m} = 6.7 \text{ mm}$ y por tanto, aplicando la ecuación 6.12 se tiene que $\omega_{out} = 0.0057 \text{ m} = 5.7 \text{ mm}$.

Para el segundo punto de focalización que se corresponde con el punto de medida de la muestras, se tiene que en este caso $\omega_{in} = 0.0057 \text{ m}$ y por tanto $\omega_{out} = 0.0053 \text{ m} = 5.3 \text{ mm}$.

Para el último punto de focalización se tendría que $\omega_{in} = 0.0053 \text{ m} = 5.3 \text{ mm}$ y por tanto, $\omega_{out} = 0.0044 \text{ m} = 4.4 \text{ mm}$.

Después de realizar estos cálculos se puede concluir que el diseño es adecuado ya que el valor de ω_{out} es pequeño, por tanto cumple las características deseadas para este diseño con espejos elípticos.

Más tarde se hablará de aumentar la frecuencia de trabajo para ver si el diseño realizado es capaz de trabajar en rangos de frecuencia todavía más altos, por lo que se volverán a realizar estos cálculos con dichas frecuencias.

6.3-DISEÑO CUATRO ESPEJOS: DOS ELÍPTICOS Y DOS PARABÓLICOS

Ahora se tienen unas características diferentes a cumplir. En este caso se desea que no se enfoque sino que se pueda medir una sección más amplia de la muestra. Por este motivo, y como se ha visto anteriormente, los espejos elegidos son los parabólicos.

Con el fin de tener un diseño desmontable y aprovechable para dos tipos de medida completamente diferentes, se ha ideado un sistema que únicamente cambie los espejos situados en el centro. Es decir, se mantendrá el diseño anterior, diseño con 4 espejos elípticos, pero en este caso se sustituirán el segundo y tercer espejo por dos espejos parabólicos.

Por tanto, al realizar este cambio el diseño quedará de la siguiente forma:

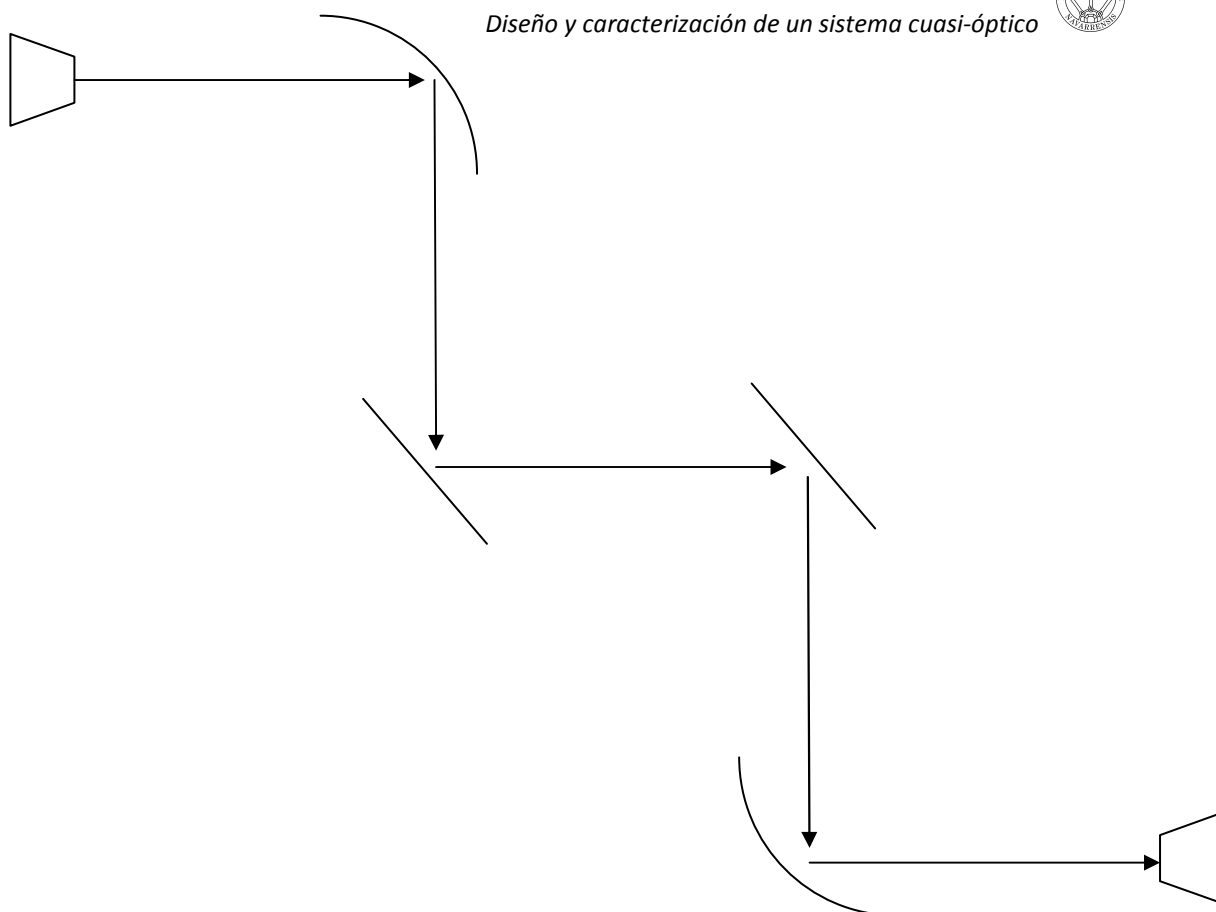


Figura 6.11 Diseño de un sistema de medida con dos espejos elípticos y dos parabólicos. Se muestra también la antena emisora y receptora.

Donde se puede apreciar que dichos espejos han cambiado para conseguir que el diseño cumpla los nuevos requisitos.

Como se ha explicado en apartados anteriores los espejos parabólicos no enfocan sino que si los rayos que inciden en el espejo provienen de su foco salen todos ellos paralelos como se muestra en la figura 6.12.

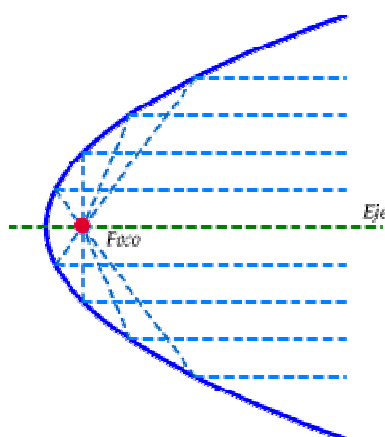


Figura 6.12: Recorrido del haz en una parábola

Por este motivo será posible medir una sección mayor de la muestra ya que el haz abarcará una superficie mayor que la que se conseguía con los espejos elípticos.

La situación en la que se colocarán los espejos centrales variará por tanto con respecto al diseño anterior ya que ahora no centraremos dichos espejos de forma que tengan coincidentes los focos, sino que los espejos parabólicos se encontraran a una distancia igual a dos veces su distancia focal. El diseño quedará por tanto de la siguiente manera:

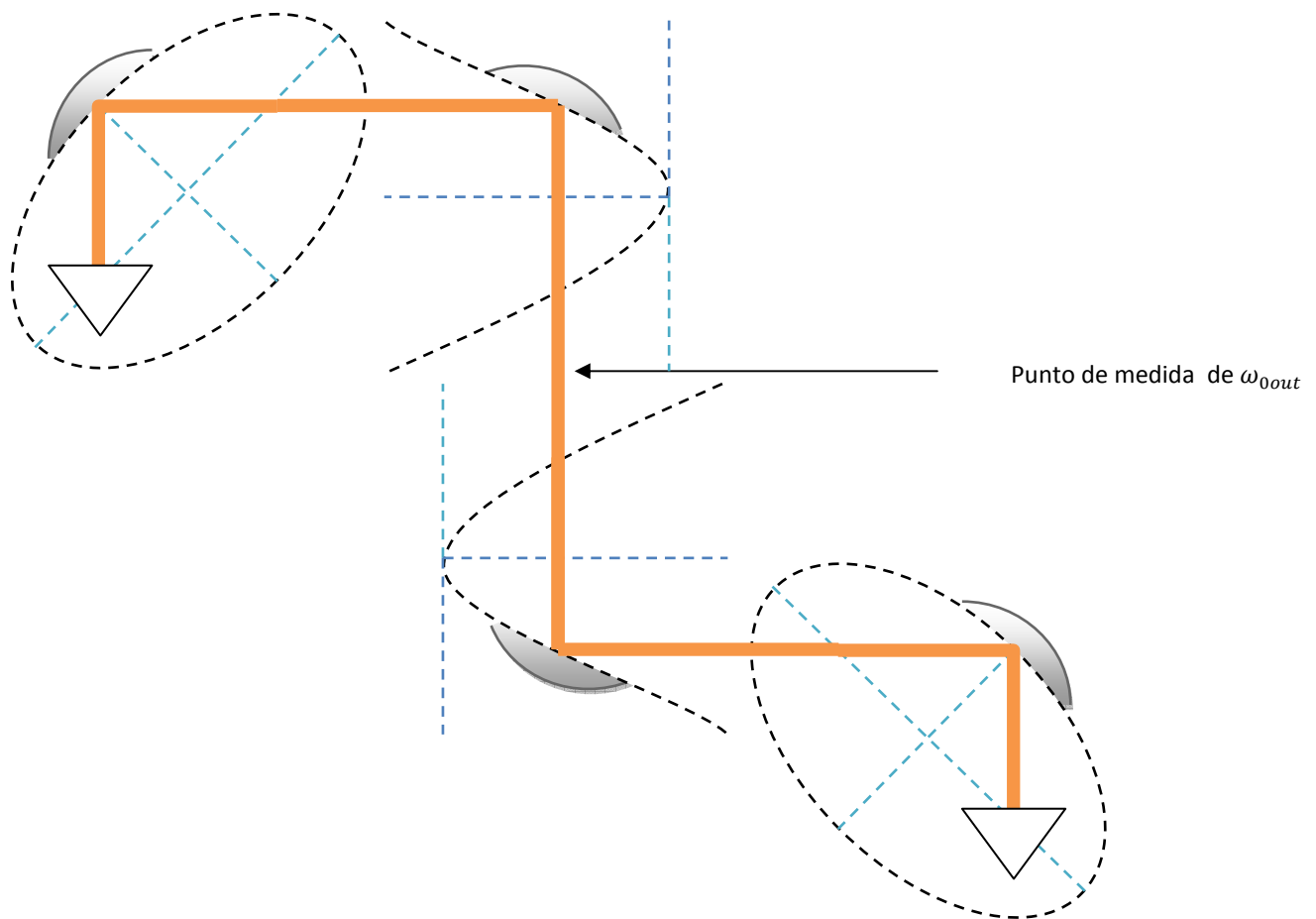


Figura 6.13: Diseño teórico 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

Se observa que como se ha comentado antes, los espejos centrales han cambiado y ahora tienen la forma de una parábola pero a pesar de ello, el diseño mantiene el resto de objetos de igual manera. Lo único que va a variar en este caso significativamente es el recorrido del rayo, debido a que los nuevos espejos parabólicos no se encuentran exactamente en el mismo punto donde estaban los elípticos. Por tanto, el recorrido del rayo será ahora mayor y en vez de ser de 1.2 m ahora será de 1.5 m. Es decir, entre el foco F2 de la primera elipse y el espejo parabólico habrá una distancia de 0.3 m, que es dos veces la distancia focal, al igual que pasa con la segunda parábola y la última elipse. Sin embargo, la distancia existente entre los dos



espejos parabólicos sigue siendo 0.30 m, igual que era en el diseño anterior entre las elipses segunda y tercera.

El punto de medida de $\omega_{0\ out}$ sigue situándose en el centro del diseño, pero en este caso no conviene que sea un valor pequeño como antes, sino que tenga un valor mayor como para medir la superficie deseada, y esto se consigue con el uso de espejos parabólicos como bien se ha comentado ya.

Una vez hecho el diseño teórico se va a pasar a implementarlo en GRASP pero para ello se deben definir unos nuevos parámetros que se van a introducir para crear los espejos parabólicos.

Ahora en GRASP se tendrán definidos dos espejos elípticos de la misma manera que en el diseño anterior y se definirán dos nuevos espejos de la siguiente forma:

Surface: "Paraboloid" → se definen en este objeto dos parámetros básicos que son "vertex(x, y, z)" y "focal_length" y sus respectivos valores son: (0, 0, 0) y 0.15 m.

Rim: "Elliptical Rim" → Los parámetros introducidos en este apartado son "centre(x,y)", "rotation" y "half_axis(x,y)" al igual que para los espejos elípticos pero sus valores varían. Dichos valores son respectivamente (0.3, 0) metros, 0 y (0.10, 0.07) metros. El valor elegido para el "half_axis" se explicará más adelante, ya que dicho valor se ha elegido teniendo en cuenta el spill-over ya que se corresponde con el tamaño del reflector y se ha decidido que todos los espejos posean el mismo valor.

Teniendo en cuenta estos cambios el diseño del sistema en GRASP quedará de la siguiente forma:

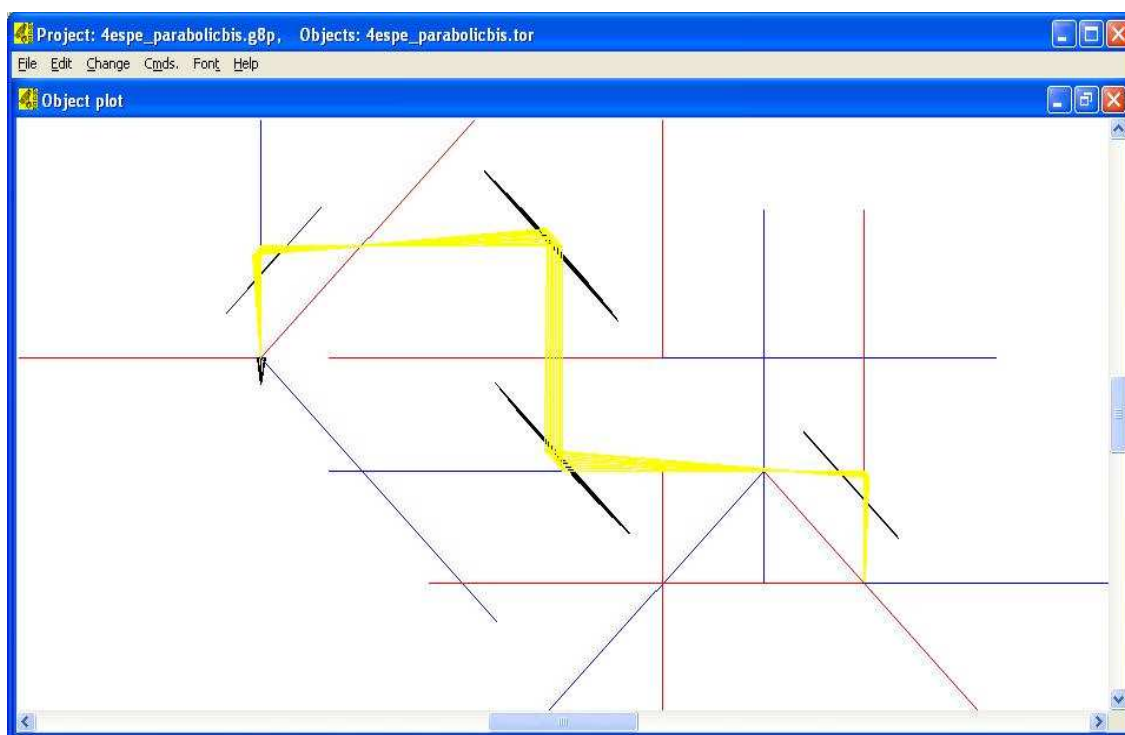


Figura 6.14: Diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos en GRASP

Como se ilustra claramente en la imagen anterior, este sistema ya no enfoca en el punto de medida, sino que se observa como los rayos se reflejan paralelos de un espejos parabólico a otro. Sin embargo sí que se observan dos puntos de focalización que se corresponden con el foco F2 de la primera elipse que hemos hecho coincidir con el foco de la parábola, y de igual manera para la otra parábola y elipse.

Como en los dos diseños anteriores se pueden observar en este último todos los objetos importantes en la imagen. Se observan los 4 espejos de dos clases diferentes, elípticos y parabólicos, así como la antena emisora y el recorrido realizado por el rayo en el sistema.

En este caso ya no es necesaria la medida de $\omega_{0\ out}$ ya que para los espejos parabólicos el tamaño de este parámetro se corresponde con la anchura del haz, un valor en torno a 0.08 m.

6.4-DISEÑO FINAL EN 3 DIMENSIONES

Se ha realizado por tanto ya el diseño teórico de los dos sistemas básicos de los que consta este proyecto. Ahora se pasará al cálculo de los resultados y a la comprobación de que este diseño es el adecuado y que cumple los requisitos establecidos.

Antes de pasar a este nuevo apartado se va a mostrar cuál será el diseño final en 3 dimensiones elaborado con un software llamado SOLIDWORKS. Estos diseños se explicarán en profundidad en el apartado de Montaje de la memoria.

Tal diseño será el siguiente para el sistema inicial con únicamente dos espejos elípticos:

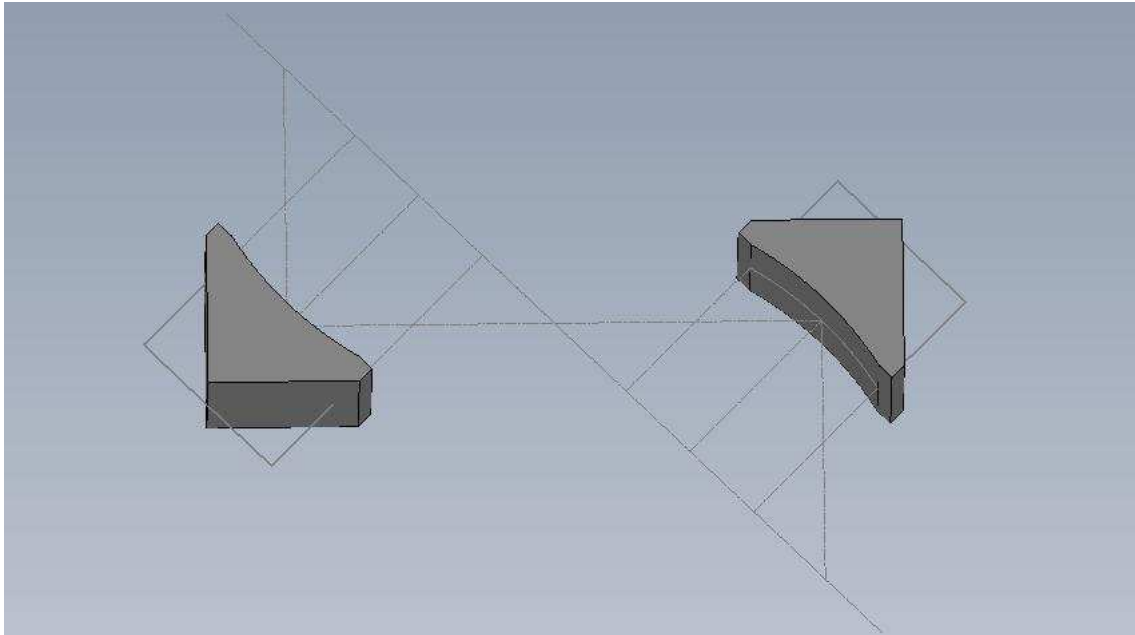


Figura 6.15: Diseño 3D 2 espejos elípticos

Para el diseño con cuatro espejos elípticos se tendrá lo siguiente:

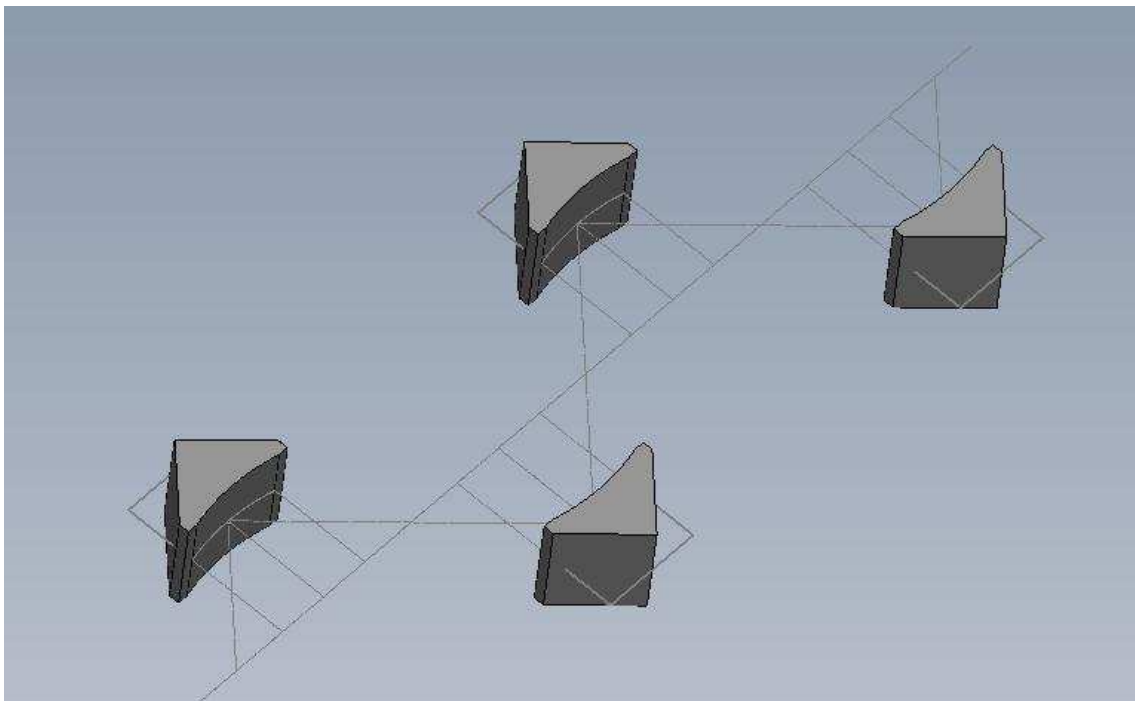


Figura 6.16: Diseño 3D 4 espejos elípticos

Y por último para el sistema que incluye dos espejos elípticos y dos parabólicos se tendrá:

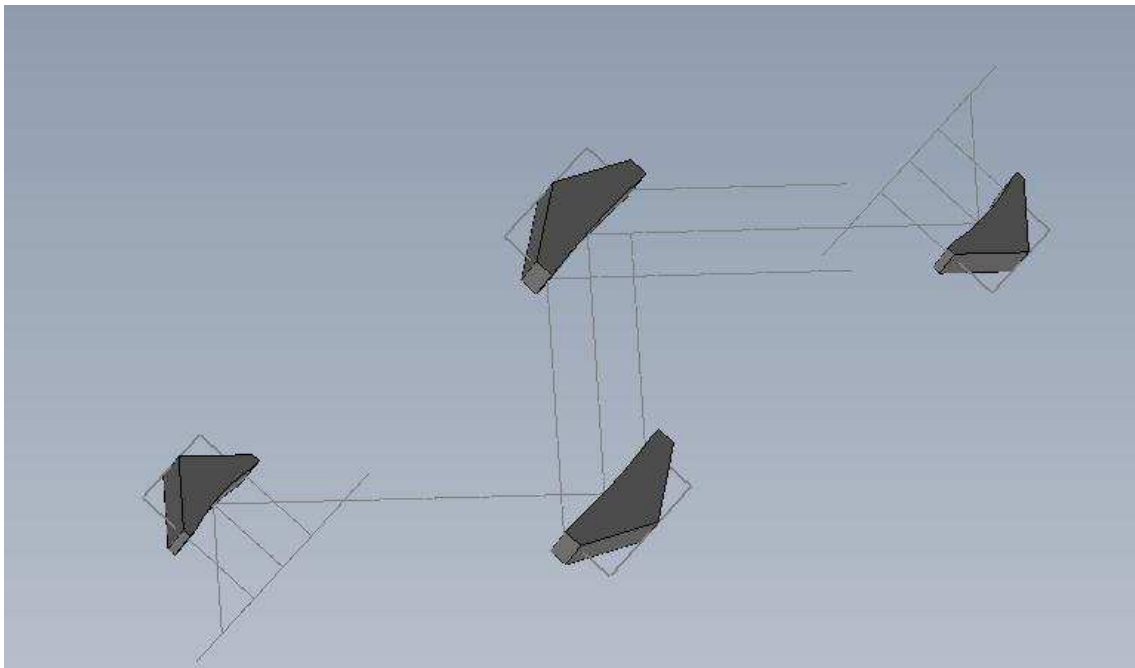


Figura 6.17: Diseño 3D 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

Una vez mostrado esto último se pasará a analizar el sistema y su comportamiento en el siguiente capítulo.



7-RESULTADOS ANTENA IDEAL

Se ha realizado ya una explicación teórica y un diseño del sistema pero falta comprobar que todo lo realizado hasta ahora tiene sentido y que los resultados obtenidos son los deseados.

Para comprobar esto se va a hablar en primer lugar del diseño inicial que se hizo con dos espejos y posteriormente se explicarán los dos diseños importantes de los que consta este proyecto.

Se ha comentado anteriormente que con estos diseños se pretendía no solo que tuviesen una frecuencia de trabajo alta como es 90 GHz sino que pudiesen trabajar en rangos más altos. Por este motivo, y para comprobar que el diseño es correcto, se van a tomar otras frecuencias y se van a realizar las mismas pruebas y obtener los resultados. Las frecuencias que se van a emplear son las siguientes: 90 GHz, 150 GHz, 220 GHz y 500 GHz.

Por tanto, los resultados que se obtendrán a continuación van a ser para cuatro frecuencias diferentes. Se compararán los resultados y se observará si el diseño cumple las expectativas.

A la hora de analizar los resultados se van a tener varios parámetros en cuenta. Como se explicó en el apartado de Diseño del sistema, gracias a GRASP se pueden calcular datos como el “spill-over” que es la potencia que se desborda, es decir, aquella que queda fuera de los espejos; o realizar cortes en el plano donde se aprecie la forma del rayo al enfocarse, después de reflejarse en cada espejo, o simplemente a la salida del sistema.

La antena que se va a utilizar para este primer cálculo del sistema es la Gaussian Feed, aunque más adelante se utilizará también una antena llamada Tabulated Feed.

Feed_definition: Gaussian Feed→ Como se definió en el apartado de Diseño de este proyecto el Gaussian Feed sería una antena ideal Gaussiana.

Tabulated Feed→ Este tipo de Antena se utilizará también para realizar un diseño con las características de una antena real. Se hablará de ello más adelante.

7.1-ANTENA GAUSSIANA EN EL PUNTO DE MEDIDA

7.1.1- DISEÑO INICIAL: DOS ESPEJOS ELÍPTICOS

Se va a analizar en primer lugar el diseño inicial para comprobar que todos los datos tomados tienen sentido y que están bien tomados.

El diseño que se tiene en GRASP es el siguiente como ya se ha visto antes:

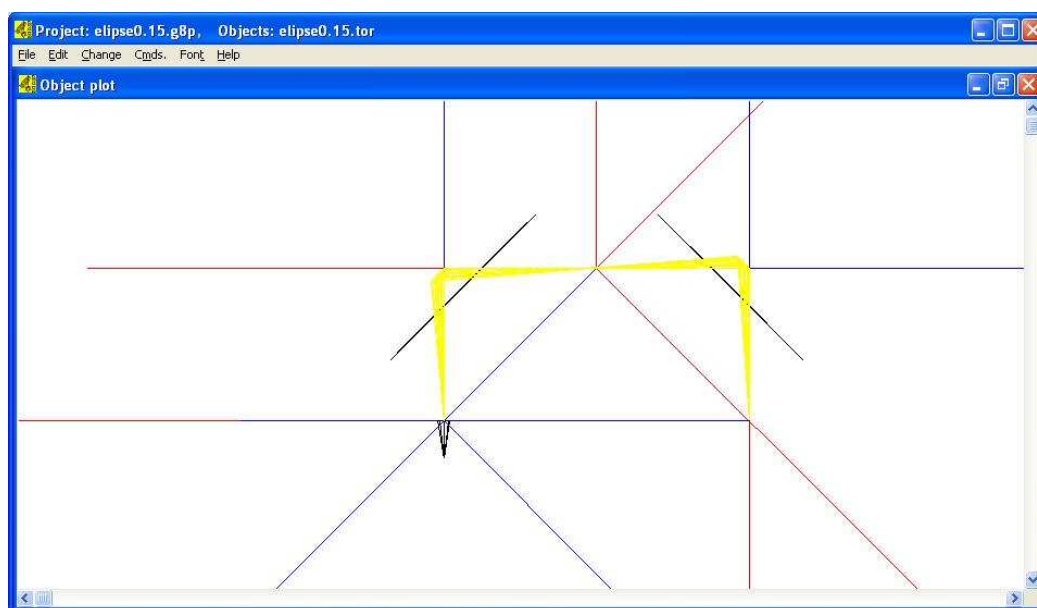


Figura 7.1: Diseño 2 espejos elípticos en GRASP

Lo primero que se puede analizar de un sistema como este es la potencia que llega a cada espejo y el spill-over que existe después de cada espejo como al final del diseño. Se van a tener en cuenta las cuatro frecuencias definidas antes y se va a ver si el sistema trabaja igual de bien para todas ellas.

Para calcular estos datos se va a definir un corte esférico en GRASP como se explicó en el apartado de Diseño y se realizará una tabla con los resultados.

Como ya se indicó anteriormente hay que decidir el tamaño del Rim de los espejos. Se dijo que se había elegido que dicho valor fuera $x=0.10$ e $y=0.07$ metros pero ahora se va a comprobar por qué se eligen estos valores. Se comprobará esto para cada diseño, ya que la elección de este parámetro está relacionada con el spill-over, como se verá a continuación. Además el tamaño de los espejos va a ser igual para todos los diseños ya que así se tendrán diseños intercambiables.

Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz

Rim		Spill-over			
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over
0.10	0.02	0.6107	2.1417 dB	0.4898	3.0996 dB
0.12	0.02	0.6200	2.0760 dB	0.5016	2.9966 dB
0.14	0.02	0.6251	2.0403 dB	0.5083	2.9385 dB
0.15	0.02	0.6269	2.0282 dB	0.5114	2.9124 dB

TABLA 7.1: Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz diseño 2 espejos elípticos



Se observa en la tabla anterior que la potencia que llega al final del sistema es prácticamente la mitad y que el spill-over es muy alto por lo que estos valores para el Rim no son buenos y habrá que realizar los cálculos de nuevo para otros valores mayores del Rim que eviten que se escape la potencia. Por ejemplo, se va a probar a cambiar el $y=0.05$ del Rim para ver si los resultados del diseño mejoran.

Rim		Spill-over			
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over
0.10	0.05	0.9666	0.1476 dB	0.9201	0.3618 dB
0.12	0.05	0.9726	0.1205 dB	0.9301	0.3148 dB
0.14	0.05	0.9752	0.1093 dB	0.9358	0.2882 dB
0.15	0.05	0.9759	0.1060 dB	0.9381	0.2776 dB

TABLA 7.2: Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz diseño 2 espejos elípticos

En este caso los resultados han mejorado considerablemente por lo que con cualquiera de los valores de la tabla anterior se tendría un buen diseño, ya que la potencia que llega al último espejo es algo más del 90% y el spill-over es muy pequeño. Como se ve en la tabla, el mejor valor para el Rim del espejo sería $x=0.15$ e $y=0.05$ metros. A pesar de tener resultados muy buenos se va a intentar conseguir una aproximación aun mejor intentando aumentar el valor de y del Rim y disminuir el de x , de forma que el espejo no sea tan grande ya que con los valores analizados ahora el diseño no es realizable ya que la distancia entre espejos no es suficiente para ese tamaño y los espejos se chocarían.


Por este motivo se calculan los siguientes resultados:

Rim		Spill-over			
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over
0.10	0.05	0.9666	0.1476 dB	0.9201	0.3618 dB
0.10	0.06	0.9874	0.0553 dB	0.9552	0.1991 dB
0.10	0.07	0.9943	0.0247 dB	0.9709	0.1283 dB

TABLA 7.3: Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz diseño 2 espejos elípticos


Los resultados obtenidos para cualquiera de estos valores son aun mejores y además de ello el spill-over es prácticamente despreciable. Por lo que, el valor elegido para el Rim de los espejos que define su tamaño es $x=0.10$ e $y=0.07$ metros.

Se va a proceder ahora a mostrar los resultados para este Rim para las diferentes frecuencias de trabajo:

 $f=150$ GHz:


Rim		Spill-over			
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over
0.10	0.07	0.9944	0.0245 dB	0.9718	0.1244 dB

TABLA 7.4: Relación Rim vs Spill-over para $f=150$ GHz diseño 2 espejos elípticos

 $f=220$ GHz:

Rim		Spill-over			
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over
0.10	0.07	0.9944	0.0244 dB	0.9718	0.1241 dB

TABLA 7.5: Relación Rim vs Spill-over para $f=220$ GHz diseño 2 espejos elípticos

 $f=500$ GHz:

Rim		Spill-over			
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over
0.10	0.07	0.9944	0.0244dB	0.9728	0.1197 dB

TABLA 7.6: Relación Rim vs Spill-over para $f=500$ GHz diseño 2 espejos elípticos

Como bien se puede ver, los valores de potencia que llegan a los espejos son aun mejores que para la frecuencia de 90 GHz conforme aumentamos ésta. Por ejemplo, para $f=500$ GHz la potencia que llega al final del sistema es casi la total y el spill-over es despreciable ya que se trata de 0.1197 dB. Por tanto, se puede concluir que el diseño está muy bien estructurado y que los resultados obtenidos para este primer ensayo son muy buenos, ya que apenas se pierde potencia en el recorrido de la energía por el sistema.

Así que como ya se había adelantado los valores del Rim son $x=0.10$ e $y=0.07$ m aunque más adelante cuando se hable de los otros dos diseños se volverá a comprobar si estos valores son los más adecuados, ya que cambian algo las características de los diseños.

Se va a proceder ahora a mostrar los resultados para el cálculo de los cortes planos en GRASP. Antes de eso se va a explicar que cortes se han tomado y el motivo por el que se han elegido dichos cortes.

El primer corte es el corte 1 que nos muestra como el rayo enfoca y posteriormente se vuelve a anchar. Para conseguir este corte se ha definido un corte plano en GRASP como se contó en el apartado de Diseño, pero aparte de eso ha sido necesario definir un sistema de coordenadas en el que situar dicho corte. Dependiendo del diseño del que se hable dicho sistema de

coordenadas variará debido a que las características no son exactamente las mismas para todos. Por tanto para este diseño inicial con dos espejos elípticos tendremos definido el corte 1 de la siguiente manera:

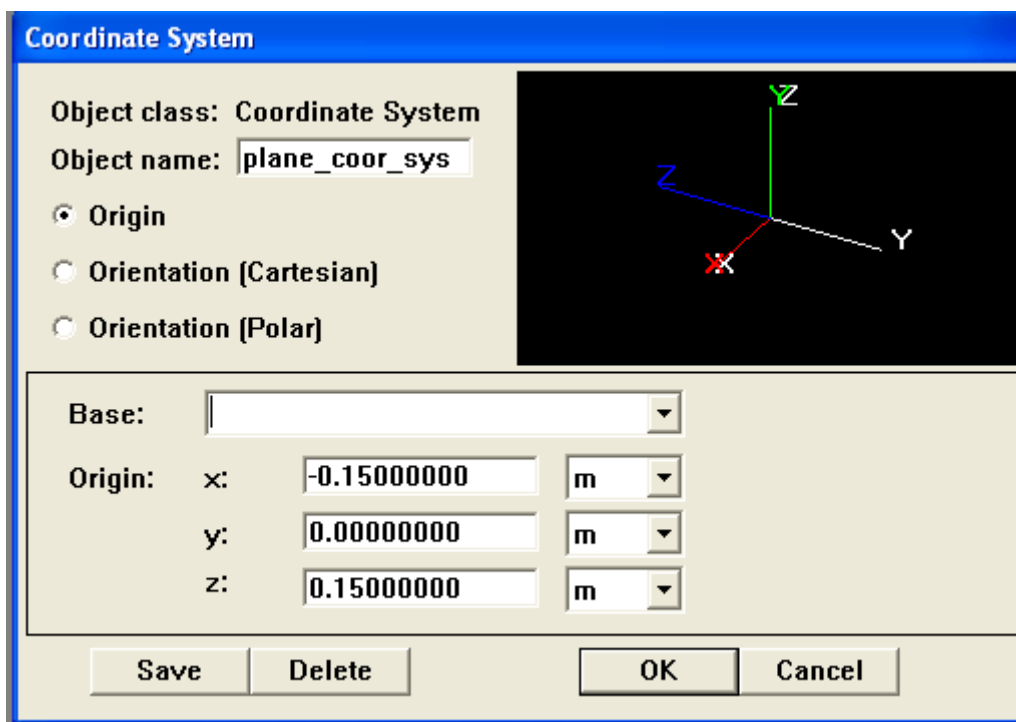


Figura 7.2: Situación corte 1 diseño 2 espejos elípticos

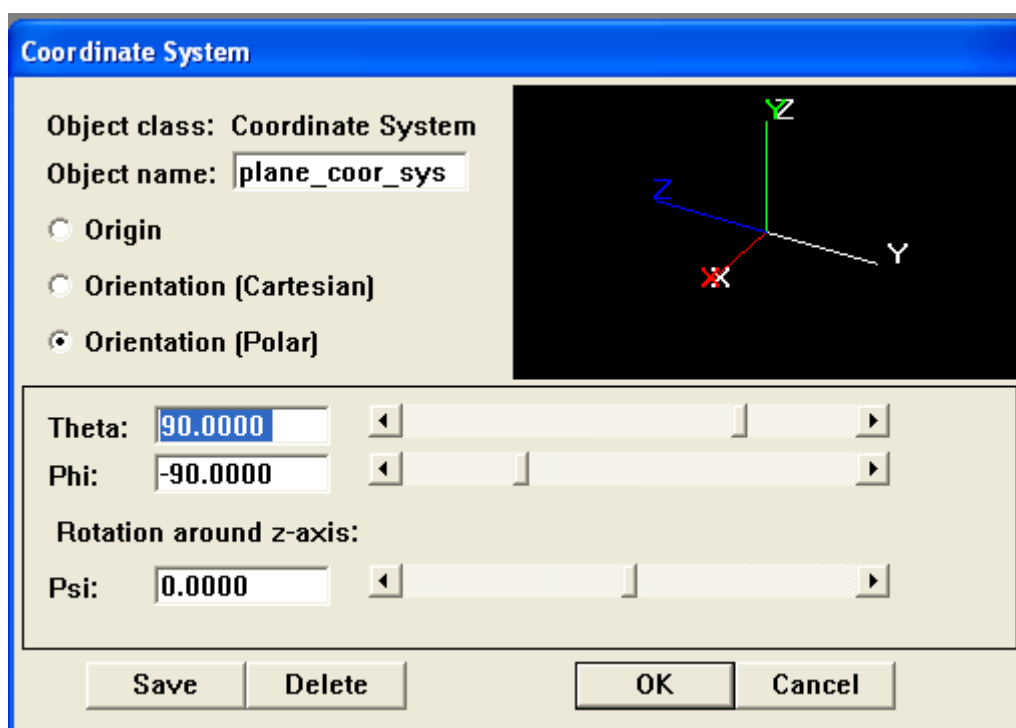


Figura 7.3: Orientación corte 1 diseño 2 espejos elípticos

Como se ve en la imágenes anteriores el corte se ha situado en el centro de los dos espejos, justo donde se encuentra el punto de focalización, ya que es eso lo que se quiere caracterizar. Con la orientación que se le ha dado al sistema de coordenadas se quiere conseguir que se vea justamente como el haz se estrecha y posteriormente se ensancha como debe ocurrir en una focalización de este tipo.

El segundo corte es el corte 2 y en este corte se quiere conseguir ver justamente el punto de focalización y gracias a esa imagen se podrá medir el parámetro $\omega_{0\ out}$. Al igual que para el corte anterior también para este caso hay que definir otro sistema de coordenadas. La situación del sistema de coordenadas será la misma sin embargo la orientación no lo es ya que queremos ver otro plano distinto del haz. Por tanto el corte 2 quedará definido de la siguiente manera:

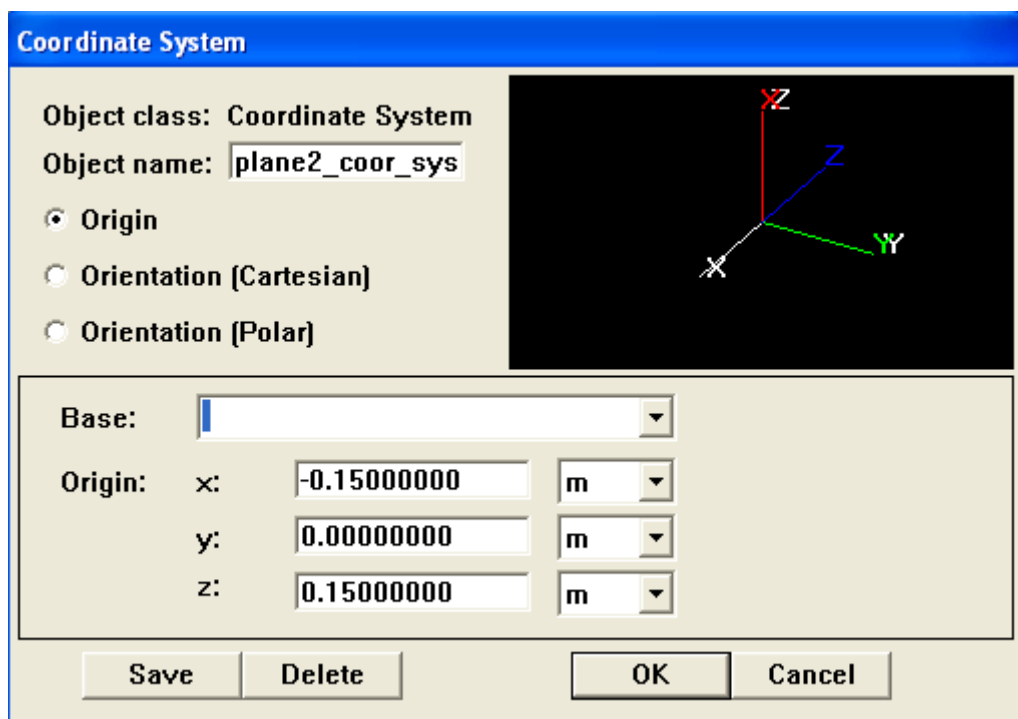


Figura 7.4: Situación corte 2 diseño 2 espejos elípticos

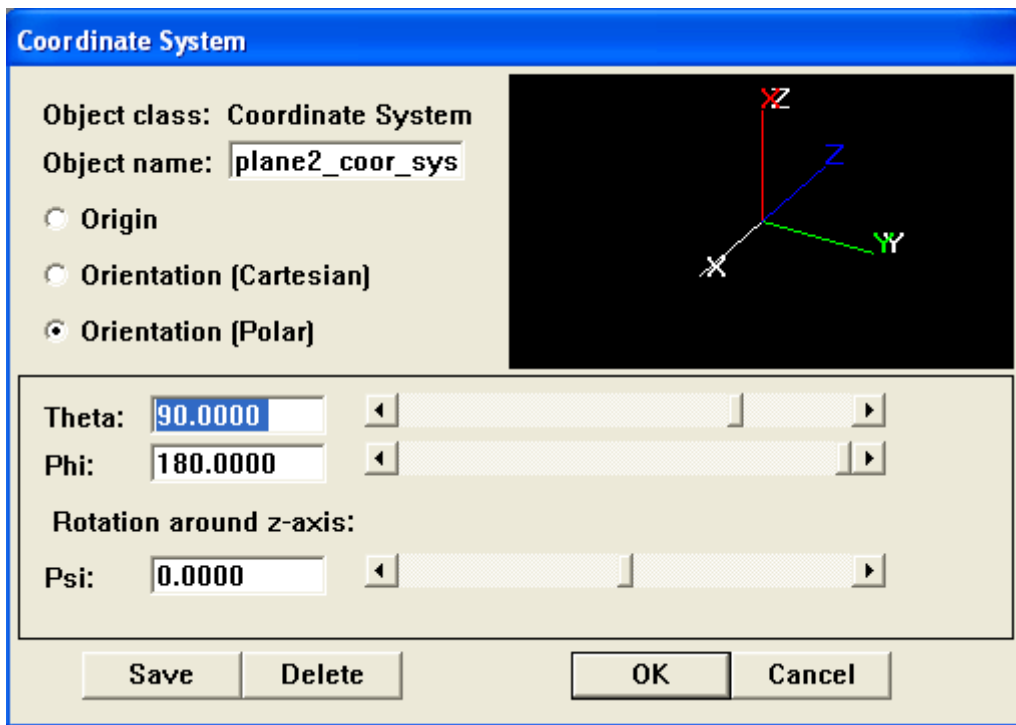


Figura 7.5: Orientación corte 2 diseño 2 espejos elípticos

Una vez que se tienen definidos los sistemas de coordenadas para los dos cortes se puede proceder a realizar las ejecuciones y obtener los resultados.

Por tanto, los resultados obtenidos para los dos cortes son los siguientes:

Corte 1:

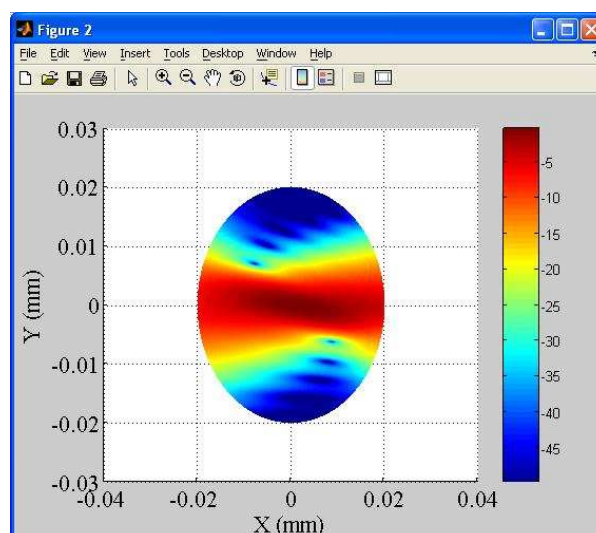


Figura 7.6: Centro 2 espejos elípticos corte 1 $f=90$ GHz Antena Ideal

En la figura anterior se observa básicamente lo que se deseaba que era la forma en la que el haz Gaussiano se estrechaba y posteriormente se ensanchaba en el punto de focalización.

Esto, como ya se ha explicado en el apartado de diseño, se debe a que los espejos son elípticos y esto provoca que el haz viaje y se refleje en el primer espejo y de ahí se enfoque en un punto llamado foco de la elipse. Esta elipse imaginaria es a la que pertenece el espejo elíptico. Como se ve la mayoría de la potencia se concentra justo en el centro, punto (0, 0). Esto era de esperar ya que según los cálculos realizados antes la potencia que llega al primer espejo es el 99.43% y al segundo espejo 97.18%.

Se observa también que no es una imagen perfectamente simétrica y que el haz no tiene la forma ideal que debería tener, sino que está un tanto desviado. En un sistema de dos espejos la reflexión en el primero hace que el haz de salida no sea simétrico por tanto, el camino recorrido es diferente con reflexión en diferente parte. El segundo espejo compensa las reflexiones.

Corte 2:

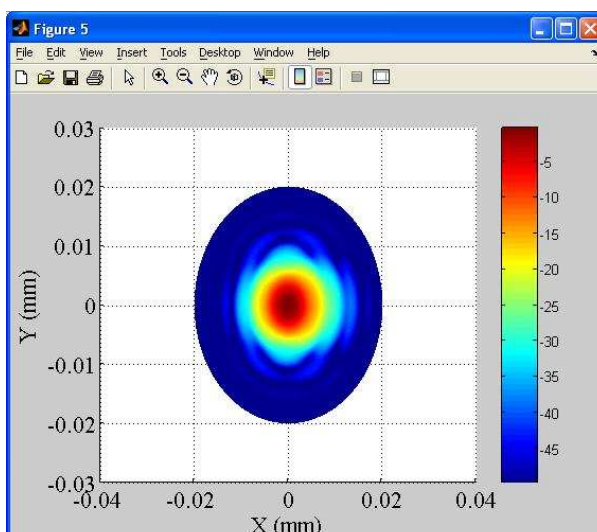


Figura 7.7: Centro 2 espejos elípticos corte 2 $f=90$ GHz Antena Ideal

Esta imagen es completamente diferente a la anterior y como bien se esperaba es un círculo. Esto es debido a que representa el corte perpendicular al haz. Por tanto, se podrá calcular a partir de esta imagen la anchura del haz en el punto de medida. A este valor lo hemos llamado $\omega_{0\ out}$ y utilizaremos la siguiente imagen para comprobar si su valor teórico se corresponde con su valor simulado.

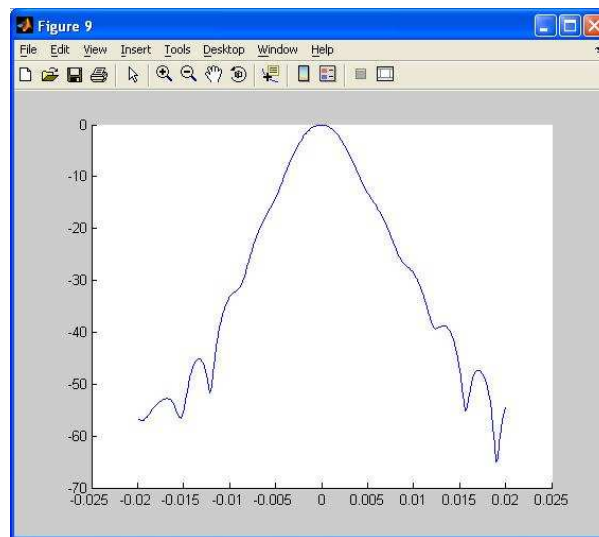


Figura 7.8: Centro 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=90$ GHz Antena Ideal

Para calcular el valor de $\omega_{0\ out}$ mediremos la anchura del haz al caer 3 dB del valor máximo. Estos valores van a ser recogidos en una tabla que se mostrará más adelante con el valor de $\omega_{0\ out}$ para las distintas frecuencias de trabajo.

Volviendo de nuevo a la imagen del Corte 2 se puede observar que la potencia se concentra prácticamente toda en el centro del círculo que se forma. También se ve que es casi un círculo perfecto y simetría del sistema.

Se mostrará a continuación los mismos resultados pero para las otras frecuencias de trabajo:

150 GHz:

Corte 1:

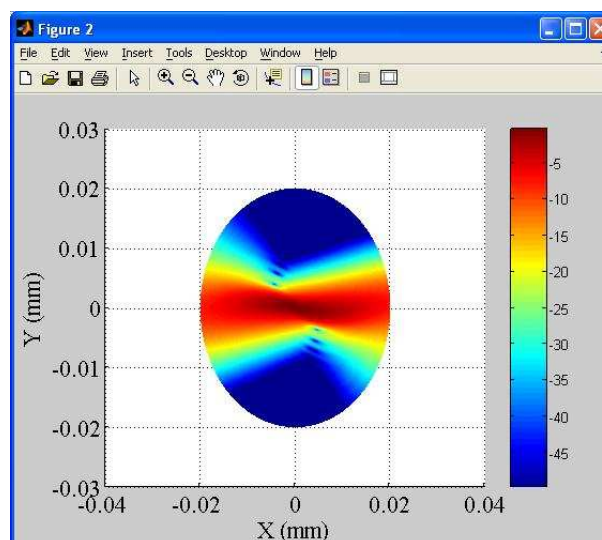


Figura 7.9: Centro 2 espejos elípticos corte 1 $f=150$ GHz Antena Ideal

En este caso, la imagen está más definida que para $f=90$ GHz y la forma del haz está mucho más clara. Se observa que la imagen está más centrada en el punto (0,0). Si la frecuencia aumenta esto implica que el enfoque sea mayor, y por tanto, el haz está más concentrado.

Corte 2:

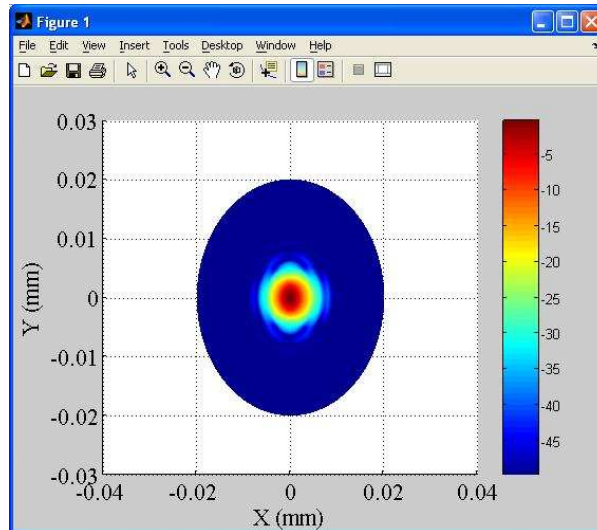


Figura 7.10: Centro 2 espejos elípticos corte 2 $f=150$ GHz Antena Ideal

Con respecto a esta imagen no hay cambios muy significativos. Se sigue observando claramente la forma circular del haz, ya que representa su anchura. Esta anchura será más fácil de medir en la siguiente figura:

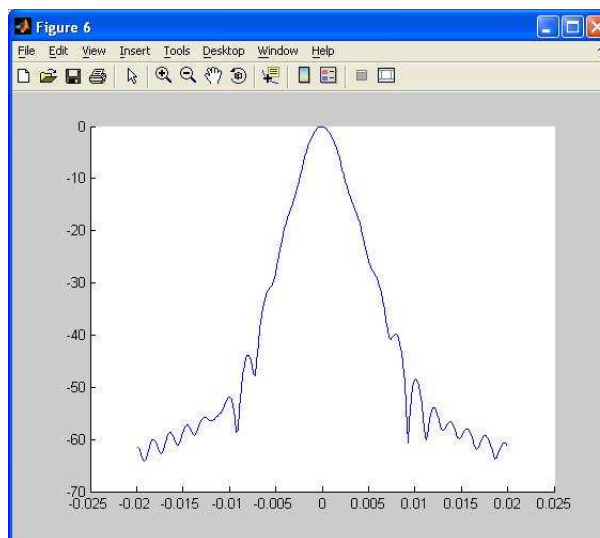


Figura 7.11: Centro 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=150$ GHz Antena Ideal

Como ya se ha comentado el valor del ancho del haz $\omega_{0 out}$ se calcula mirando la caída a -3 dB, y su valor se mostrará más adelante en una tabla resumen con todas las frecuencias. Se puede

adelantar que esta figura es mucho más estrecha por tanto, el valor de $\omega_{0\ out}$ será más pequeño conforme se aumente la frecuencia.

220 GHz:

Corte 1:

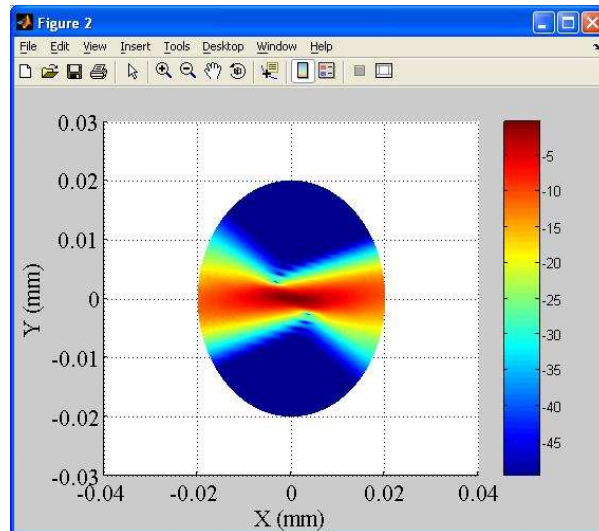


Figura 7.12: Centro 2 espejos elípticos corte 1 $f=220$ GHz Antena Ideal

Como es de esperar al ir aumentando la frecuencia se ve más claramente la forma del haz al llegar al punto de focalización y conforme se aleja de él.

Corte 2:

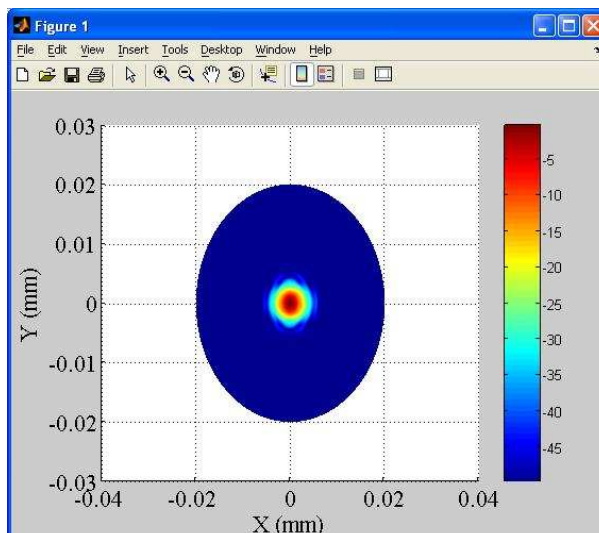


Figura 7.13: Centro 2 espejos elípticos corte 2 $f=220$ GHz Antena Ideal

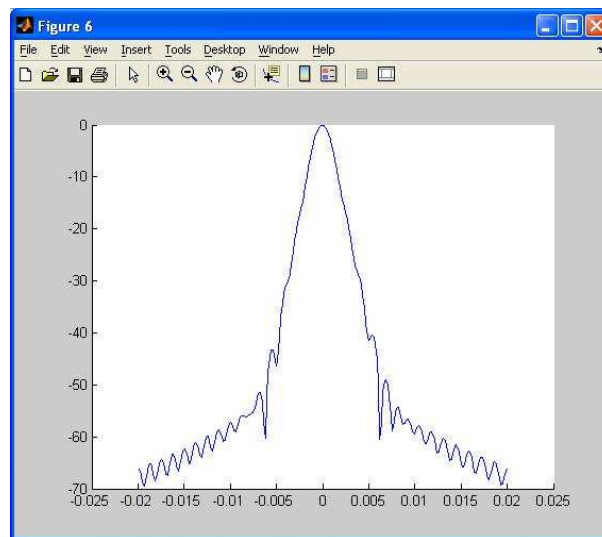


Figura 7.14: Centro 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 \text{ out}}$ $f=220$ GHz Antena Ideal

El valor de $\omega_{0 \text{ out}}$ se reducirá aun más.

500 GHz:

Corte 1:

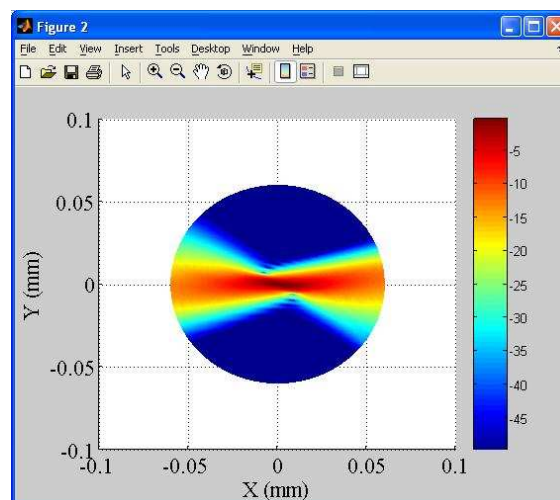


Figura 7.15: Centro 2 espejos elípticos corte 1 $f=500$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

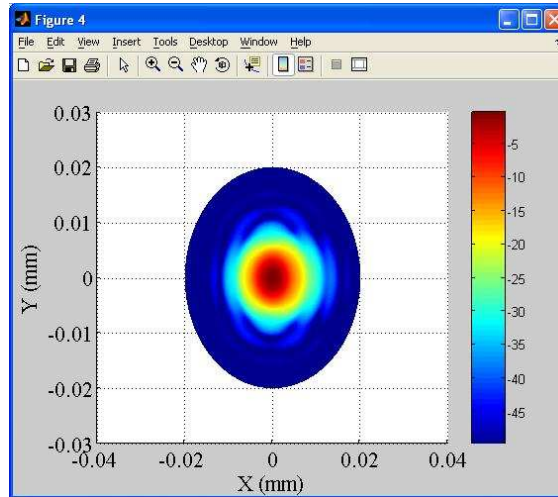


Figura 7.16: Centro 2 espejos elípticos corte 2 f=500 GHz Antena Ideal

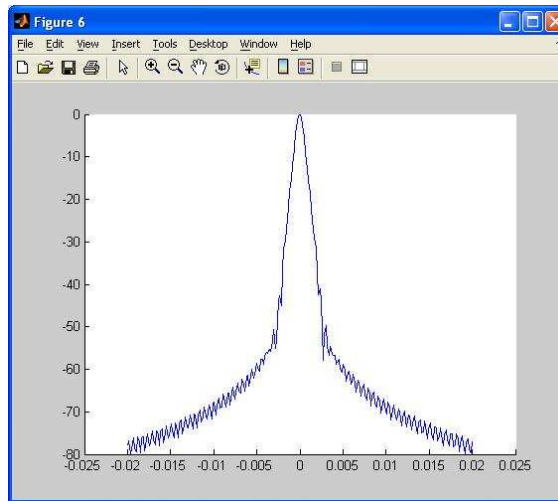


Figura 7.17: Centro 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 \text{ out}}$ f=500 GHz Antena Ideal

Como se observa de las imágenes anteriores del Corte 1 al ir aumentando la frecuencia de trabajo el haz se define cada vez más y está más centrado en el centro (0, 0). Se enfoca más por lo que $\omega_{0 \text{ out}}$ tiende a disminuir.

Ya se ha comentado que se mostraría una tabla resumen con el valor calculado de $\omega_{0 \text{ out}}$ para las distintas frecuencias de trabajo pero primero es necesario realizar el cálculo teórico de dicho valor. Para realizarlo será necesario utilizar la siguiente ecuación:

$$\omega_{0 \text{ out}} = \frac{\omega_{0 \text{ in}}}{[(Cd_{in} + D)^2 + C^2 z_c^2]^{0.5}} \quad (7.1)$$

Sabiendo que los valores para la matriz de transformación de un espejo elíptico son:

$$M_{elíptica} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & 1 \end{bmatrix}, \quad (7.2)$$



Con $R_1 = R_2 = d_{in} = d_{out} = 0.15 \text{ m}$.

Una vez hecho esto ya es posible calcular los resultados y mostrarlos en la tabla 7.7. Los valores dados de ω_0 están en milímetros en esta tabla y en las sucesivas.

$d_{in}(\text{m})$	$f(\text{GHz})$	ω_{0in}	Punto de medida	
			$\omega_{0 out_calculada}$	$\omega_{0 out_simulada}$
0.15	90	6.3	5.7	4.46
0.15	150	3.8	3.6	2.70
0.15	220	2.6	2.5	1.84
0.15	500	1.1	1.1	7.80

TABLA 7.7: Tabla resumen valores $\omega_{0 out}$ diseño 2 espejos elípticos Antena Ideal

Como se ve en la tabla anterior al ir aumentando la frecuencia el haz de estrecha y $\omega_{0 out}$ es más pequeño. También se puede observar que los valores simulados son incluso mejores que los calculados teóricamente.

7.1.2- DISEÑO CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS

Se va a analizar en este apartado los resultados obtenidos para el diseño de cuatro espejos elípticos. En primer lugar es importante recordar que el objetivo de este diseño es conseguir medir muestras con una gran resolución, es decir, poder medir secciones muy pequeñas de un material. Para conseguir realizar este objetivo se ha visto necesaria la utilización de espejos elípticos ya que sus propiedades de enfocamiento son requeridas para este diseño.

Por estos motivos, al igual que se vio en el apartado de diseño, se va a tener el siguiente sistema:

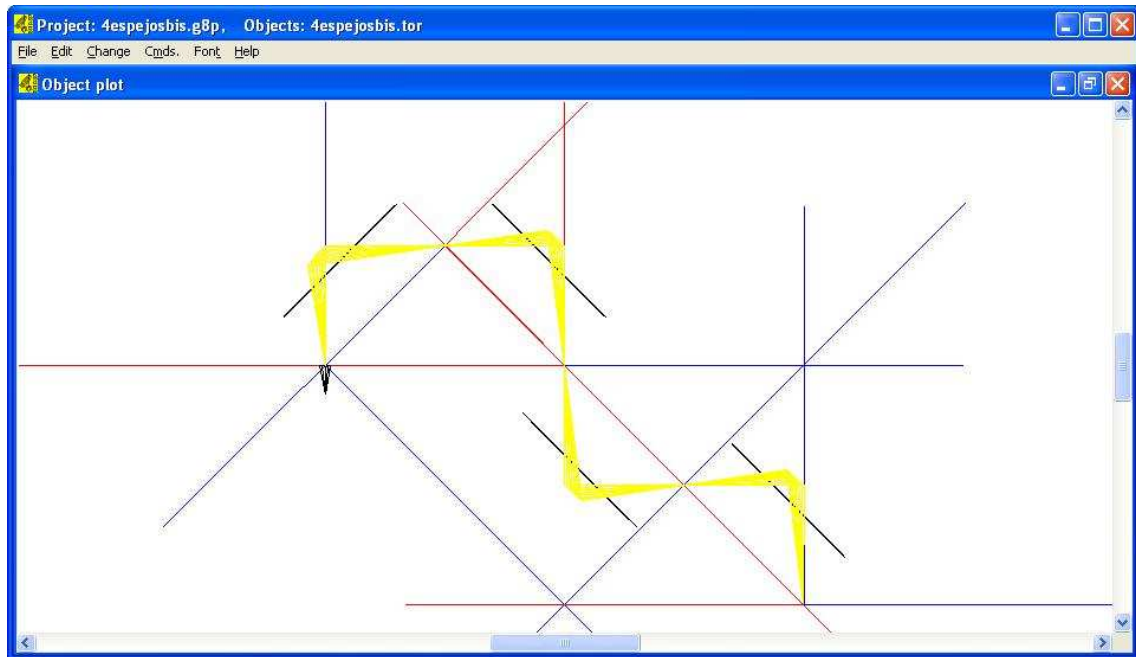


Figura 7.18: Diseño 4 espejos elípticos en GRASP

Se va a analizar de nuevo en primer lugar la potencia que llega a cada espejo y el spill-over que existe después de cada espejo como al final del diseño. Hay que tener en cuenta las cuatro frecuencias de trabajo por lo que se van a calcular estos mismos datos para cada una de ellas.

Para realizar estos cálculos se va a definir un corte esférico en GRASP como se ha hecho para el diseño inicial de dos espejos elípticos.

Como ya se ha realizado en el diseño anterior hay que decidir el tamaño del Rim de los espejos. Éste tiene el siguiente valor $x=0.10$ e $y=0.07$ metros pero ahora se va a comprobar por qué se eligen estos valores también para este otro diseño de cuatro espejos elípticos. Dado que la elección de este parámetro está relacionada con el spill-over, como ya se ha comentado, se va a calcular este parámetro y se decidirá cuál es el valor deseado que define el tamaño de los espejos.



Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz:

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.02	0.6107	2.1417 dB	0.4898	3.0996 dB	0.3586	4.4542 dB	0.2663	5.7456 dB
0.12	0.02	0.6200	2.0760 dB	0.5016	2.9967 dB	0.3713	4.3031 dB	0.2773	5.5705 dB
0.14	0.02	0.6251	2.0403 dB	0.5083	2.9386 dB	0.3788	4.2158 dB	0.2841	5.4656 dB
0.15	0.02	0.6269	2.0282 dB	0.5114	2.9125 dB	0.3816	4.1841 dB	0.2865	5.4280 dB

TABLA 7.8: Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz diseño 4 espejos elípticos

Se observa en la tabla anterior que la potencia que llega al final del sistema es menos del 30% y el spill-over demasiado alto por lo que estos valores para el Rim no son buenos y habrá que realizar los cálculos de nuevo para otros valores más acertados. Por ejemplo, se va a probar como se hizo con el diseño de dos espejos elípticos, al cambiar el $y=0.05$ del Rim para ver si los resultados del diseño mejoran.

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.05	0.9666	0.1476 dB	0.9201	0.3618 dB	0.8915	0.4985 dB	0.8630	0.6401 dB
0.12	0.05	0.9726	0.1205 dB	0.9301	0.3148 dB	0.9067	0.4254 dB	0.8820	0.5454 dB
0.14	0.05	0.9752	0.1093 dB	0.9358	0.2882 dB	0.9146	0.3878 dB	0.8916	0.4982 dB
0.15	0.05	0.9759	0.1060 dB	0.9381	0.2777 dB	0.9172	0.3753 dB	0.8947	0.4830 dB

TABLA 7.9: Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz diseño 4 espejos elípticos



En este caso los resultados han mejorado como ya se vio para el diseño anterior por lo que con cualquiera de los valores de la tabla anterior se tendría un buen diseño, ya que la potencia que llega al último espejo es casi del 90% y el spill-over es bastante pequeño. Como se ve en la tabla, el mejor valor para el Rim del espejo sería $x=0.15$ e $y=0.05$ metros. A pesar de tener resultados muy buenos se va a intentar conseguir una aproximación aun mejor intentando aumentar el valor de y del Rim y disminuir el de x , de forma que el espejo no sea tan grande.


Por este motivo se calculan los siguientes valores:

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.05	0.9666	0.1476 dB	0.9201	0.3618 dB	0.8915	0.4985 dB	0.8630	0.6401 dB
0.10	0.06	0.9874	0.0553 dB	0.9552	0.1991 dB	0.9397	0.2699 dB	0.9233	0.3467 dB
0.10	0.07	0.9943	0.0247 dB	0.9709	0.1283 dB	0.9620	0.1683 dB	0.9524	0.2119 dB

TABLA 7.10: Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz diseño 4 espejos elípticos

Los resultados obtenidos para cualquiera de estos valores son aun mejores ya que llega al cuarto espejo más de 95% de la potencia y además de ello el spill-over es muy pequeño. Por lo que, como ya se sabía, el valor elegido para el Rim de los espejos es $x=0.10$ e $y=0.07$ metros.


Se va a proceder ahora a mostrar los resultados para este Rim a las distintas frecuencias de trabajo:

 $f=150$ GHz:

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.07	0.9944	0.0245 dB	0.9718	0.1244 dB	0.9678	0.1423 dB	0.9641	0.1588 dB


TABLA 7.11: Relación Rim vs Spill-over para $f=150$ GHz diseño 4 espejos elípticos



 $f=220$ GHz:

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.07	0.9944	0.0244 dB	0.9718	0.1241 dB	0.9689	0.1373 dB	0.9664	0.1482 dB

TABLA 7.12: Relación Rim vs Spill-over para $f=220$ GHz diseño 4 espejos elípticos

 $f=500$ GHz:

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.07	0.9944	0.0244 dB	0.9728	0.1197 dB	0.9703	0.1310 dB	0.9721	0.1228 dB

TABLA 7.13: Relación Rim vs Spill-over para $f=500$ GHz diseño 4 espejos elípticos

Como se observa en las tablas anteriores, los valores de potencia que llegan a los espejos son aun mejores que para la frecuencia de 90 GHz conforme aumentamos ésta. Por ejemplo, para $f=500$ GHz la potencia que llega al final del sistema es el 97% y el spill-over es casi despreciable ya que se trata de 0.1228 dB. Por tanto, se puede concluir que el diseño está muy bien estructurado y que los resultados obtenidos para este segundo diseño son igual de buenos que para el anterior, ya que apenas se pierde potencia en el recorrido de la energía por el sistema a pesar de que el recorrido es mucho mayor.

Así que como ya se había adelantado los valores del Rim son $x=0.10$ e $y=0.07$ m aunque se volverá a comprobar para el diseño de 4 espejos con dos elípticos y dos parabólicos.

Se va a proceder de nuevo a mostrar los resultados para el cálculo de los cortes planos en GRASP para este diseño. Pero antes de realizar esto se va a explicar que cortes se han tomado y el motivo por el que se han elegido dichos cortes.

El primer corte es el corte 1 que nos muestra en este caso el punto de focalización y gracias a esa imagen se podrá calcular el parámetro $\omega_{0 \text{ out}}$. Lo que mide cada corte cambia con respecto al caso anterior ya que la orientación no es la misma. Por tanto, ahora el corte 1 se corresponde con el corte perpendicular de haz y no con la forma de dicho haz. De este modo, el sistema de coordenadas que se tendrá para el corte 1 será el siguiente:

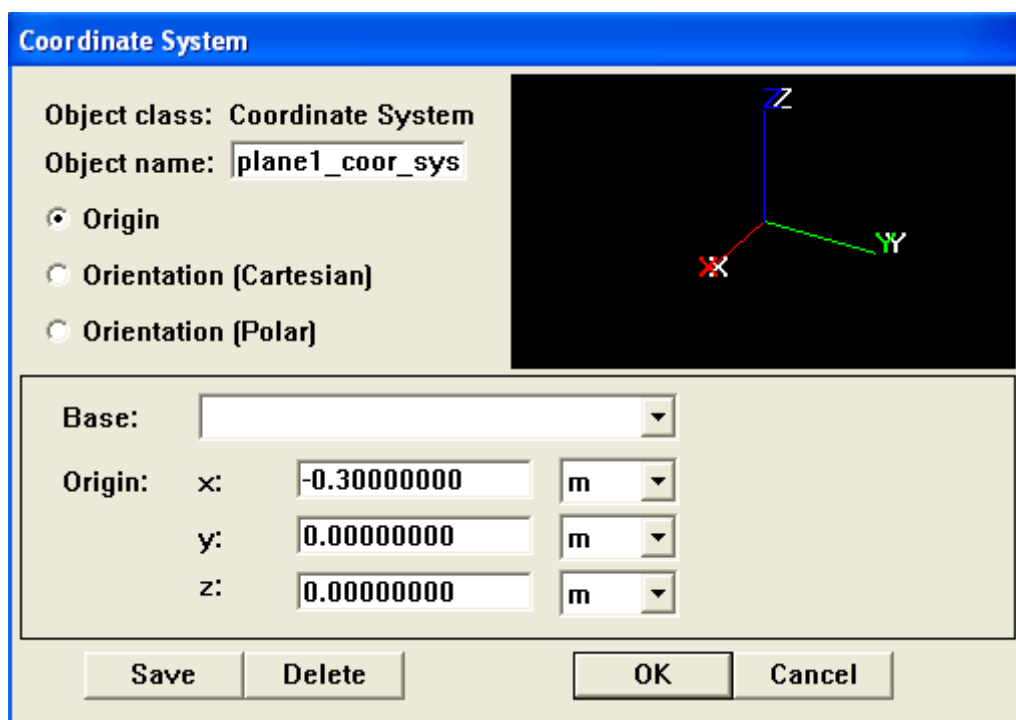


Figura 7.19: Situación corte 1 diseño 4 espejos elípticos

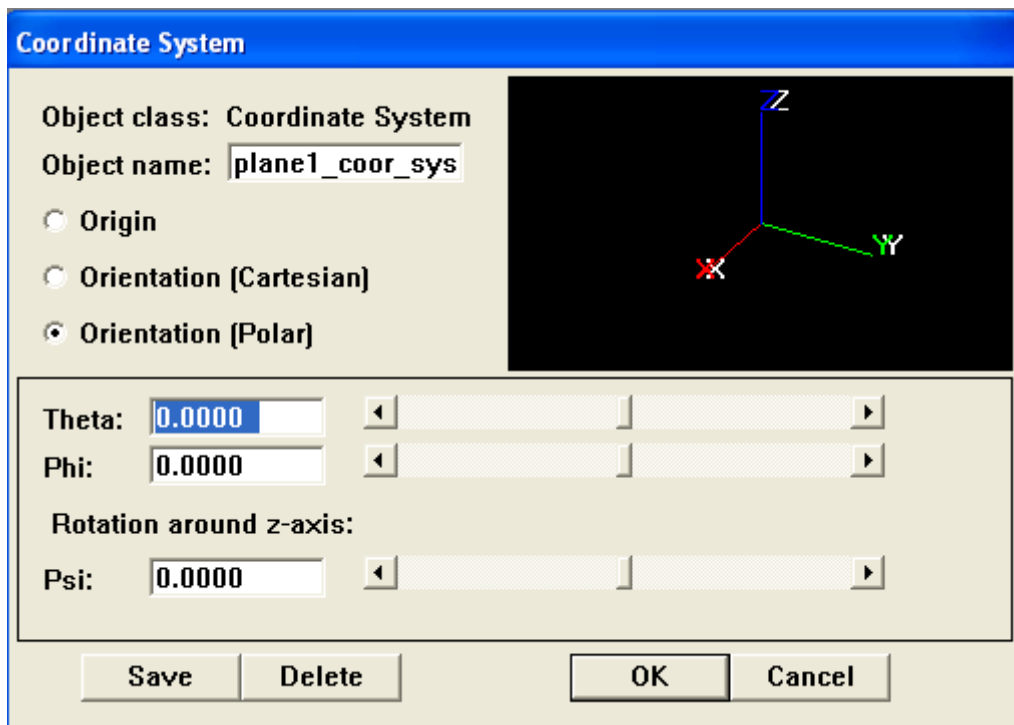


Figura 7.20: Orientación corte 1 diseño 4 espejos elípticos

Como se ve en las figuras anteriores el corte se ha situado en el centro del segundo y tercer espejo, justo donde se encuentra el punto central de focalización. Con la orientación que se le ha dado al sistema de coordenadas se quiere conseguir que se vea el ancho del haz, es decir, $\omega_{0\ out}$.

El segundo corte es el corte 2 y en este corte se quiere ver la forma que adquiere el haz al llegar al punto de focalización. Al igual que para el corte anterior también para este caso hay que definir otro sistema de coordenadas. La situación del sistema de coordenadas será la misma sin embargo la orientación no lo va a ser ya que se desea ver otro plano distinto del haz. Por tanto el corte 2 quedará definido de la siguiente manera:

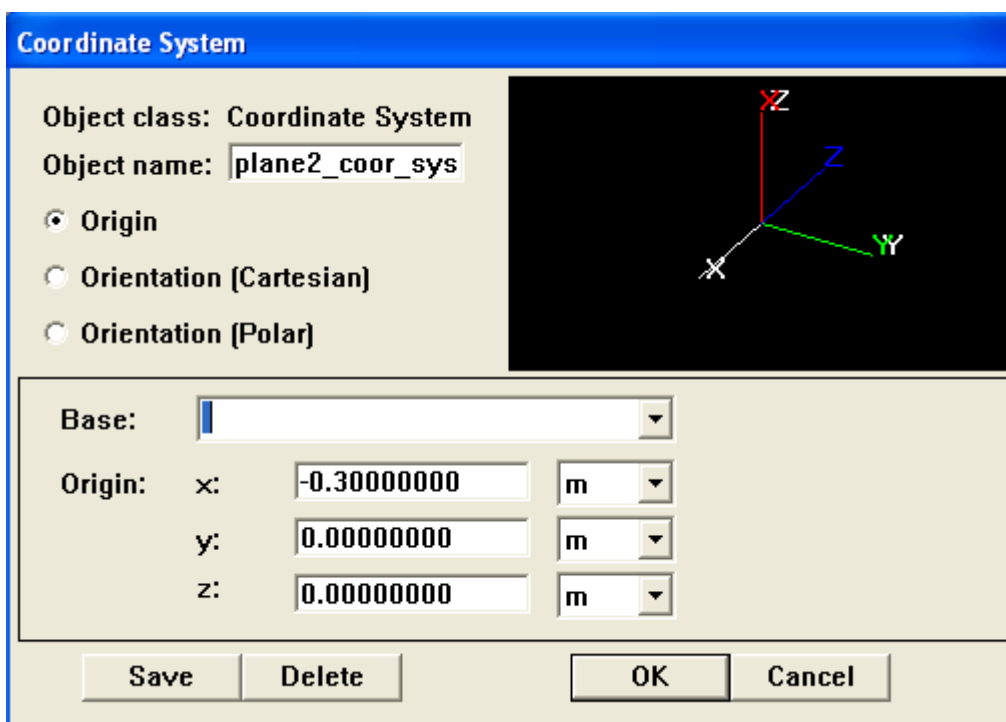


Figura 7.21: Situación corte 2 diseño 4 espejos elípticos

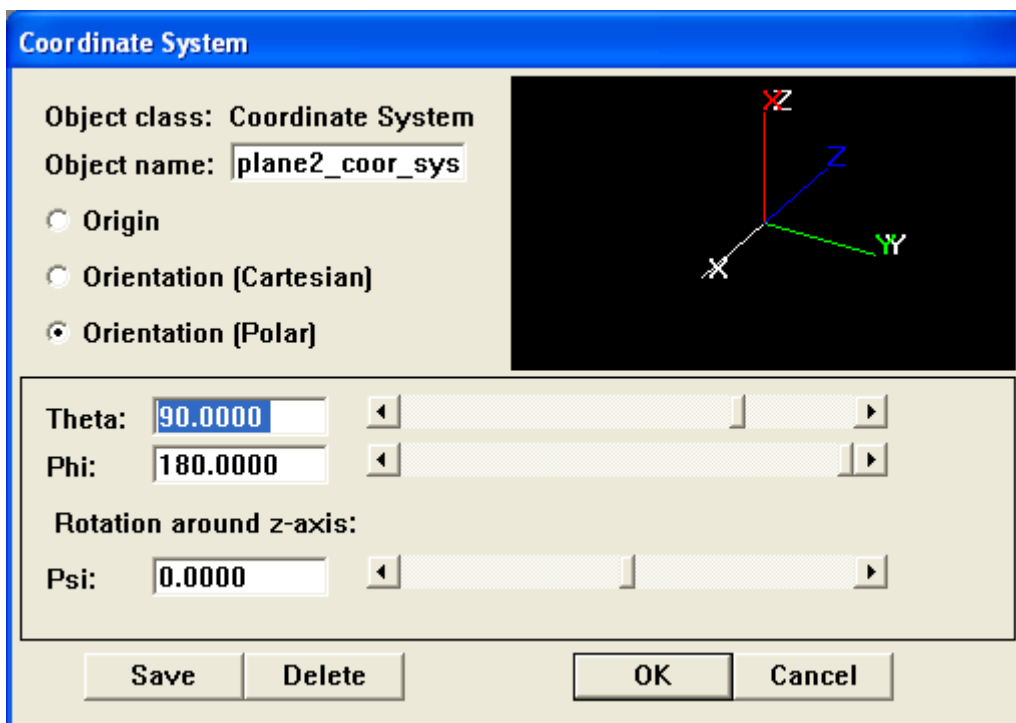


Figura 7.22: Orientación corte 2 diseño 4 espejos elípticos

Una vez definidos los sistemas de coordenadas se puede proceder a calcular los resultados para cada uno de los cortes para este nuevo diseño.

Para la frecuencia de trabajo $f=90$ GHz se tienen los siguientes valores:

Corte 1:

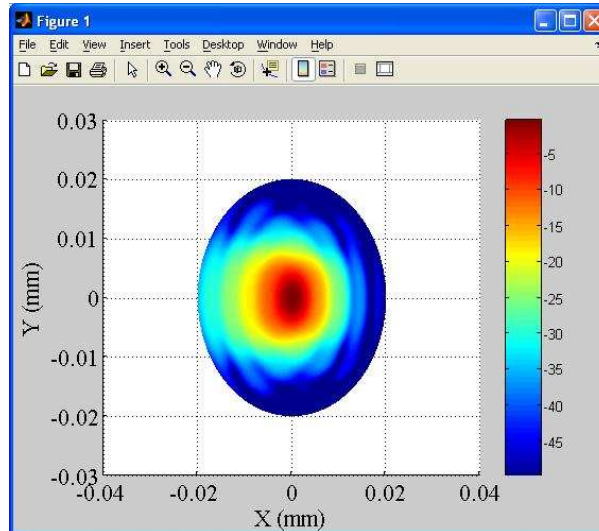


Figura 7.23: Centro 4 espejos elípticos corte 1 $f=90$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

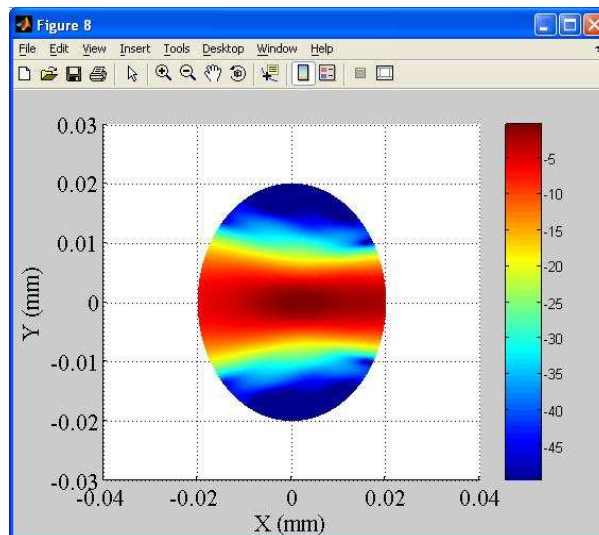


Figura 7.24: Centro 4 espejos elípticos corte 2 $f=90$ GHz Antena Ideal

Al igual que para el diseño anterior se observan las dos imágenes más representativas que muestran la forma que toma el haz al enfocarse y el corte perpendicular al haz que permite calcular $\omega_{0 out}$.

Las imágenes son similares al caso anterior aunque ahora el haz sigue una forma más simétrica y está más centrado. Al tener 2 espejos antes del punto de medida hace que la imagen sea más simétrica.

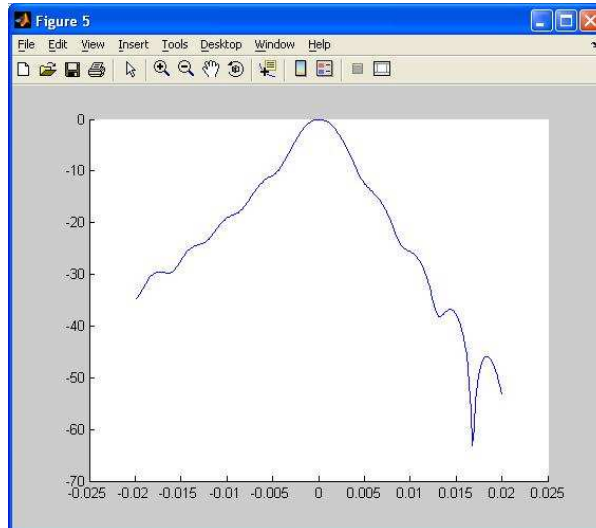



Figura 7.25: Centro 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=90$ GHz Antena Ideal

También se muestra la figura anterior para medir el valor de $\omega_{0\ out}$. Al final de este apartado se calcularán todos los valores de $\omega_{0\ out}$ para las distintas frecuencias.

Como en el diseño anterior se van a calcular los resultados para todas las frecuencias de trabajo.

 $f=150$ GHz:

Corte 1:

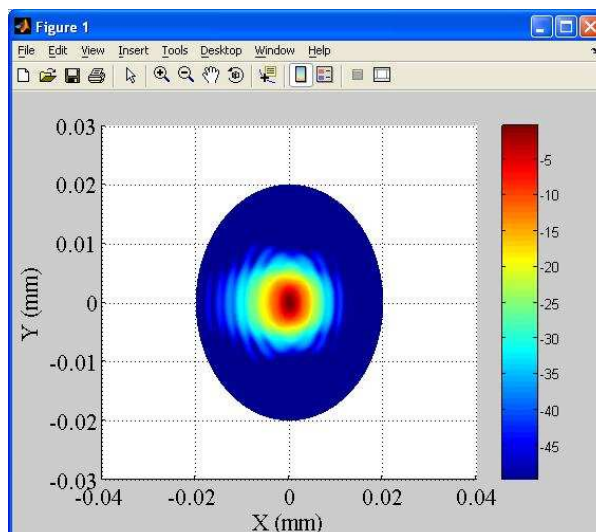


Figura 7.26: Centro 4 espejos elípticos corte 1 $f=150$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

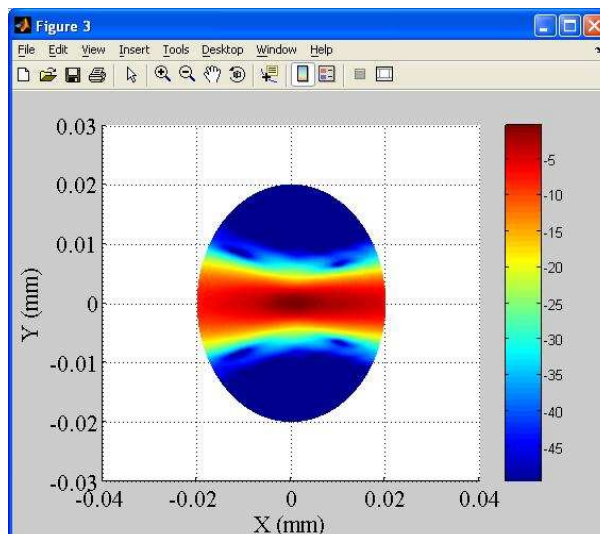


Figura 7.27: Centro 4 espejos elípticos corte 2 $f=150$ GHz Antena Ideal

Con respecto a la figura de 90 GHz se ve que el haz se estrecha más en el foco, punto (0,0)

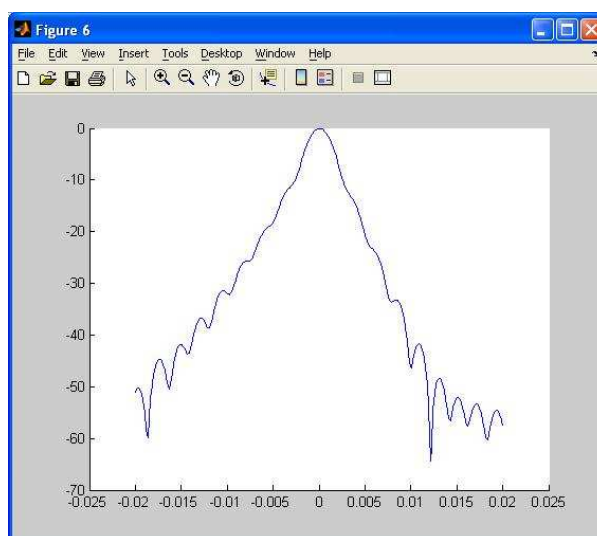



Figura 7.28: Centro 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=150$ GHz Antena Ideal

Como ya era de esperar el valor de $\omega_{0 out}$ será menor ya que esta imagen es más estrecha que la anterior.

 $f=220$ GHz:

Corte 1:

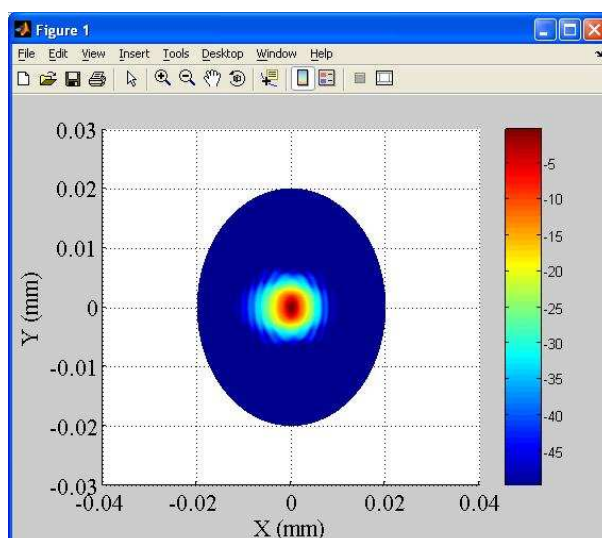


Figura 7.29: Centro 4 espejos elípticos corte 1 $f=220$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

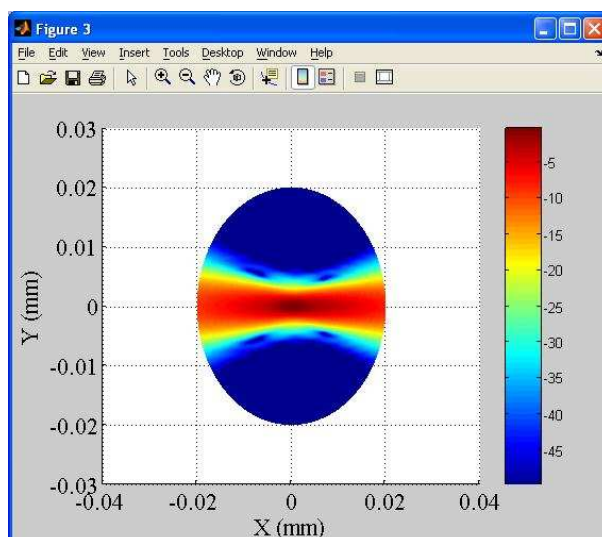


Figura 7.30: Centro 4 espejos elípticos corte 2 $f=220$ GHz Antena Ideal

De la misma forma se tiene ahora un haz con una forma más definida y estrecho.

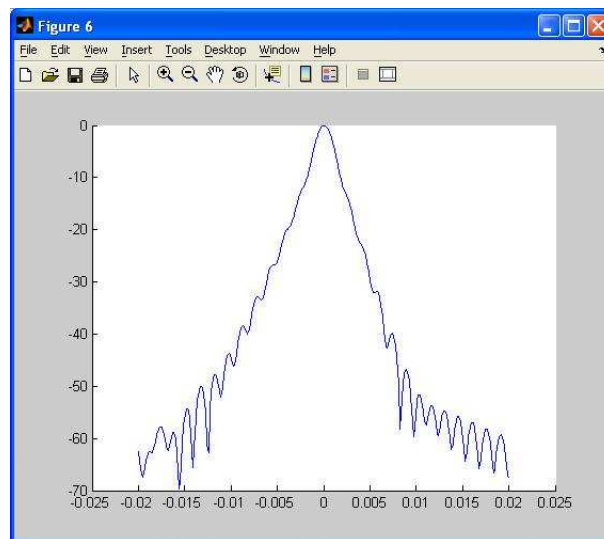



Figura 7.31: Centro 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 \text{ out}}$ $f=220$ GHz Antena Ideal

 $f=500$ GHz:

Corte 1:

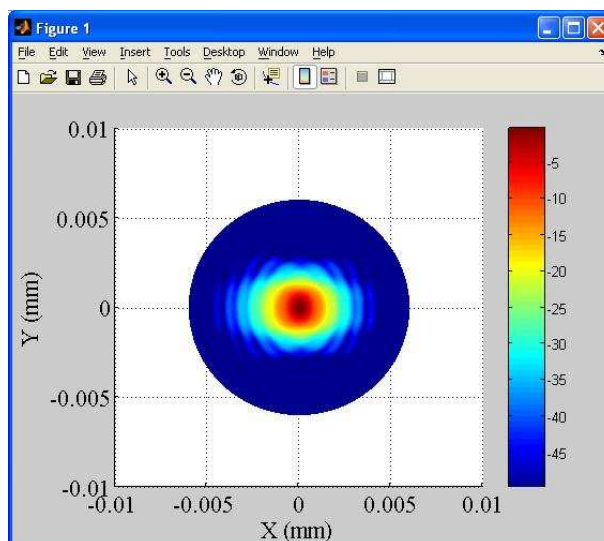


Figura 7.32: Centro 4 espejos elípticos corte 1 $f=500$ GHz Antena Ideal

Se observa muy bien como el haz es simétrico concentrado.

Corte 2:

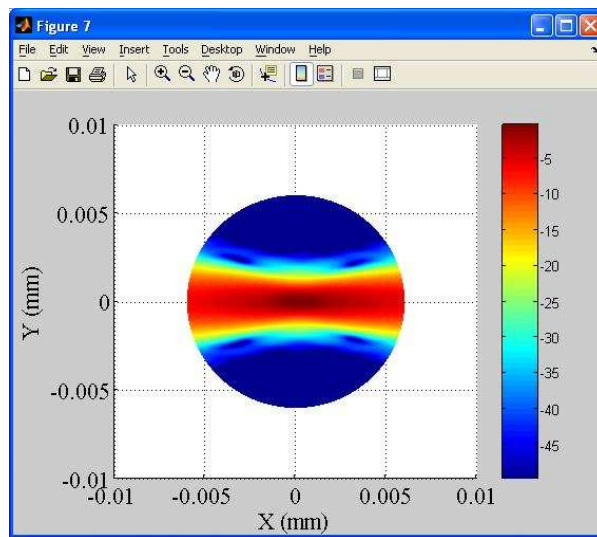


Figura 7.33: Centro 4 espejos elípticos corte 2 $f=500$ GHz Antena Ideal

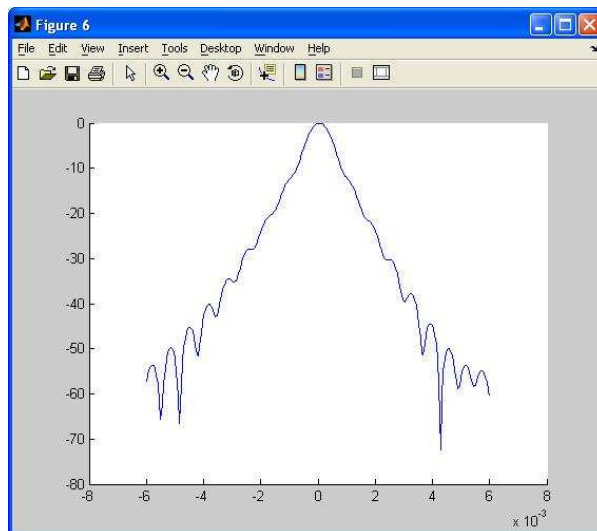


Figura 7.34: Centro 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=500$ GHz Antena Ideal

El haz de la figura anterior es más estrecho que en los casos anteriores, por tanto, $\omega_{0\ out}$ tendrá un valor menor.

Al igual que en el caso anterior se va a mostrar una tabla resumen con los valores calculados para $\omega_{0\ out}$. Dichos valores como bien se ha explicado antes se miden en la tercera figura calculada para cada frecuencia y es el valor que tiene el ancho de haz al caer 3 dB por debajo de su potencia máxima. Por tanto los valores para $\omega_{0\ out}$ serán los siguientes:

$d_{in}(m)$	$f(GHz)$	ω_{0in}	Punto de medida	
			$\omega_{0out} \text{ calculada}$	$\omega_{0out} \text{ simulado}$
0.15	90	6.3	5.3	4.28
0.15	150	3.8	3.5	2.50
0.15	220	2.6	2.5	1.70
0.15	500	1.1	1.1	0.79

TABLA 7.14: Tabla resumen valores ω_{0out} diseño 4 espejos elípticos Antena Ideal

Igual que en el caso anterior los valores de ω_{0out} van disminuyendo conforme se aumenta la frecuencia y son incluso mejores para el caso simulado que para el calculado teóricamente.

7.1.3- DISEÑO CUATRO ESPEJOS: 2 ELÍPTICOS Y 2 PARABÓLICOS

Se va a analizar en este apartado los resultados obtenidos para el diseño de cuatro espejos teniendo dos espejos elípticos y dos parabólicos. En primer lugar es importante recordar que el objetivo de este diseño es conseguir medir zonas más grandes de los materiales deseados. Al utilizar estos espejos parabólicos en vez de los elípticos que se tenían antes se consigue que en vez de enfocar y medir una pequeña sección de un material se mida una sección más amplia. Como se explicó en el apartado de diseño los espejos parabólicos tienen la característica de que los rayos reflejados salen todos paralelos y con un ancho de haz similar al de entrada, sin que tenga lugar ningún enfocamiento. Esto se muestra en la siguiente figura:

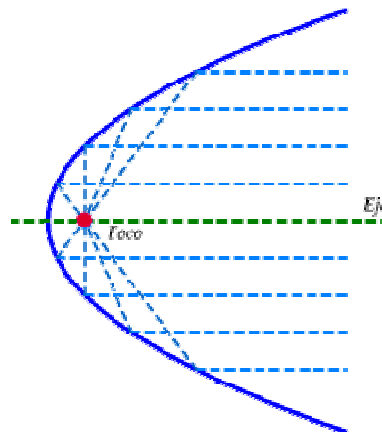


Figura 7.35: Recorrido del haz en una parábola

Por estos motivos, al igual que se vio en el apartado de diseño, se va a tener el siguiente sistema:

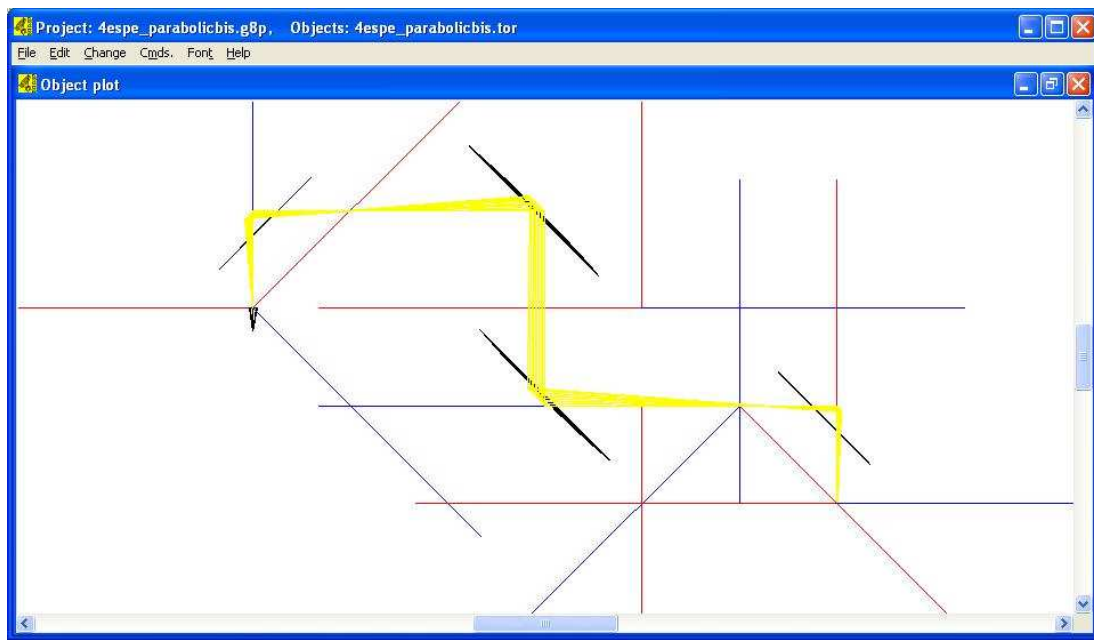


Figura 7.36: Diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos en GRASP

Como en los dos casos anteriores lo primero que se va a analizar de un sistema como este es la potencia que llega a cada espejo y el spill-over que existe después de cada espejo como al final del diseño. Se van a tener en cuenta las cuatro frecuencias definidas antes y se va a ver si el sistema trabaja igual de bien para todas ellas.

Para calcular estos datos se va a definir un corte esférico en GRASP como se explicó en el apartado de Diseño y se realizará una tabla con los resultados.

Como ya se ha visto anteriormente el tamaño del Rim elegido es $x=0.10$ e $y=0.07$ metros para ambos diseños. Se va a verificar si para este otro diseño se mantienen las mismas características y se elige el mismo tamaño.



Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.02	0.6107	2.1417 dB	0.5528	2.5744 dB	0.5466	2.6233 dB	0.4389	3.5765 dB
0.12	0.02	0.6200	2.0760 dB	0.5697	2.4435 dB	0.5676	2.4596 dB	0.4543	3.4264 dB
0.14	0.02	0.6251	2.0403 dB	0.5810	2.3579 dB	0.5800	2.3660 dB	0.4623	3.3503 dB
0.15	0.02	0.6269	2.0282 dB	0.5855	2.3244 dB	0.5846	2.3312 dB	0.4711	3.2691 dB

TABLA 7.15: Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

Se observa en la tabla anterior que la potencia que llega al final del sistema es menos de la mitad y que el spill-over es muy alto por lo que estos valores para el Rim no son buenos, al igual que para los dos diseños anteriores, y habrá que realizar los cálculos de nuevo para otros valores más acertados. Por ejemplo, se va a probar a cambiar el $y=0.05$ del Rim para ver si los resultados del diseño mejoran. Hay que tener en cuenta que para estos cálculos se ha tomado que para los espejos parabólicos el rim es $x=0.1$ e $y=0.1$ metros, por este motivo los resultados son tan buenos.

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.05	0.9666	0.1476 dB	0.8670	0.6200 dB	0.8462	0.7255 dB	0.8202	0.8606 dB
0.12	0.05	0.9726	0.1205 dB	0.8853	0.5290 dB	0.8765	0.5727 dB	0.8506	0.7025 dB
0.14	0.05	0.9752	0.1093 dB	0.8978	0.4680 dB	0.8925	0.4937 dB	0.8650	0.6299 dB
0.15	0.05	0.9759	0.1060 dB	0.9027	0.4447 dB	0.8981	0.4667 dB	0.8861	0.5250 dB

TABLA 7.16: Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

Se ve claramente como los resultados han mejorado considerablemente y ahora se tiene en el cuarto espejo una potencia casi del 90%. A pesar de esto, y dado que conocemos que para el resto de diseños se ha elegido un tamaño de Rim diferente a éste se va a probar con otros valores.




Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.05	0.9666	0.1476 dB	0.6643	1.7766 dB	0.6056	2.1783 dB	0.5866	2.3164 dB
0.10	0.06	0.9874	0.0553 dB	0.7342	1.3421 dB	0.6833	1.6538 dB	0.6689	1.7465 dB
0.10	0.07	0.9943	0.0247 dB	0.7882	1.0334 dB	0.7431	1.2893 dB	0.7306	1.3633 dB

TABLA 7.17: Relación Rim vs Spill-over para $f=90$ GHz diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

En este caso se ha tomado que para todos los espejos ya sean elípticos o parabólicos el Rim es el que pone en la tabla.

Los resultados obtenidos para cualquiera de estos valores son muy buenos y además de ello el spill-over tiene un valor pequeño. Por lo que, como ya se sabía, el valor elegido para el Rim de los espejos es $x=0.10$ e $y=0.07$ metros para todos ellos.

Se va a proceder ahora a mostrar los resultados para este Rim a las distintas frecuencias nombradas anteriormente:

 $f=150$ GHz:

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.07	0.9944	0.0245 dB	0.7939	1.0025 dB	0.7528	1.2333 dB	0.7447	1.2804 dB

TABLA 7.18: Relación Rim vs Spill-over para $f=150$ GHz diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos



f=220 GHz:

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.07	0.9944	0.0245 dB	0.7939	1.0025 dB	0.7528	1.2333 dB	0.7447	1.2804 dB

TABLA 7.19: Relación Rim vs Spill-over para f=220 GHz diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

f=500 GHz:

Rim		Spill-over							
x	y	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
0.10	0.07	0.9944	0.0244 dB	0.7939	1.0025 dB	0.7528	1.2333 dB	0.7447	1.2804 dB

TABLA 7.20: Relación Rim vs Spill-over para f=500 GHz diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

Como bien se puede ver, los valores de potencia que llegan a los espejos son aun mejores que para la frecuencia de 90 GHz al aumentarla pero no varía entre las otras frecuencias. La potencia que llega al final del sistema es casi del 75% y el spill-over no es muy alto, 1.2804 dB. Por tanto, se puede concluir que el diseño es válido.

Así que como ya se había adelantado los valores del Rim son $x=0.10$ e $y=0.07$ m al igual que para los otros dos diseños.

Haciéndolos mayores probablemente se bajase el spill-over, pero al tener el mismo tamaño de los espejos para todos los diseños se consigue que éstos sean intercambiables. Esto es una característica muy importante a la hora de ahorrar coste en la fabricación de los espejos ya que algunos de ellos se podrán mantener para ambos diseños.

A continuación se va a proceder de nuevo a mostrar los resultados para el cálculo de los cortes en GRASP para este diseño. Pero antes de realizar esto se va a explicar de nuevo que cortes se han tomado y el motivo por el que se han elegido dichos cortes.

El primer corte es el corte 1 que nos muestra en este caso el punto de focalización y gracias a esa imagen se podrá medir el parámetro $\omega_{0\ out}$, aunque para este tipo de espejos parabólicos $\omega_{0\ out}$ no tiene tanto interés como antes. Los cortes definidos para este tercer sistema son los mismos que para el sistema de cuatro espejos elípticos ya que la orientación en la que se miden las muestras es la misma. El corte 1 se corresponde por tanto con el corte perpendicular de haz. De este modo, el sistema de coordenadas que se tendrá para el corte 1 será el siguiente:

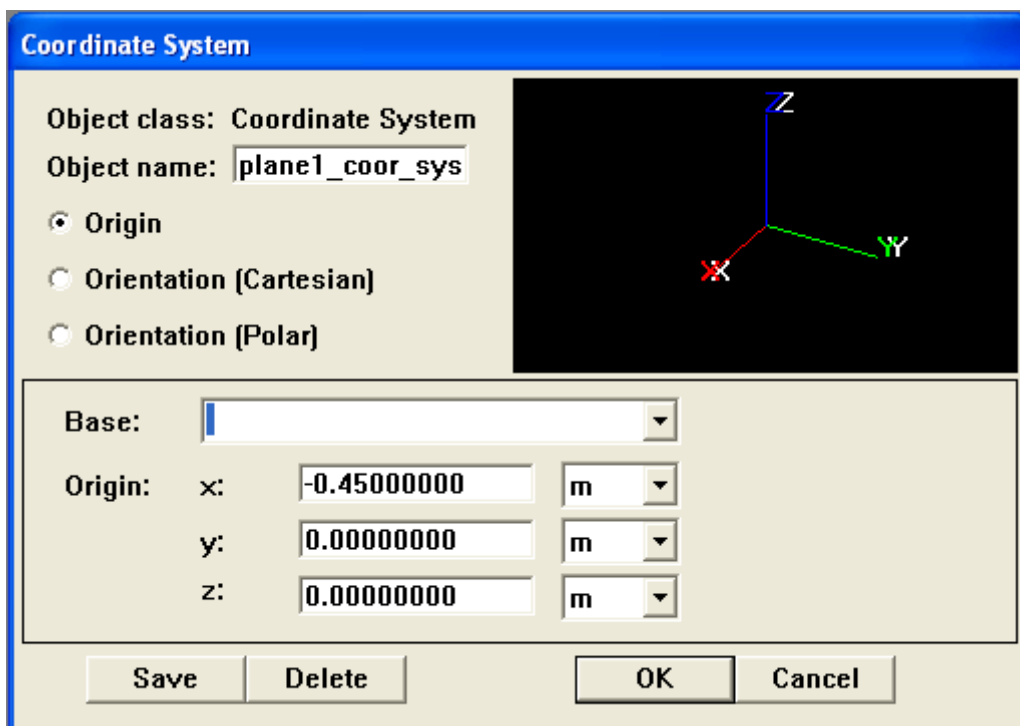


Figura 7.37: Situación corte 1 diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

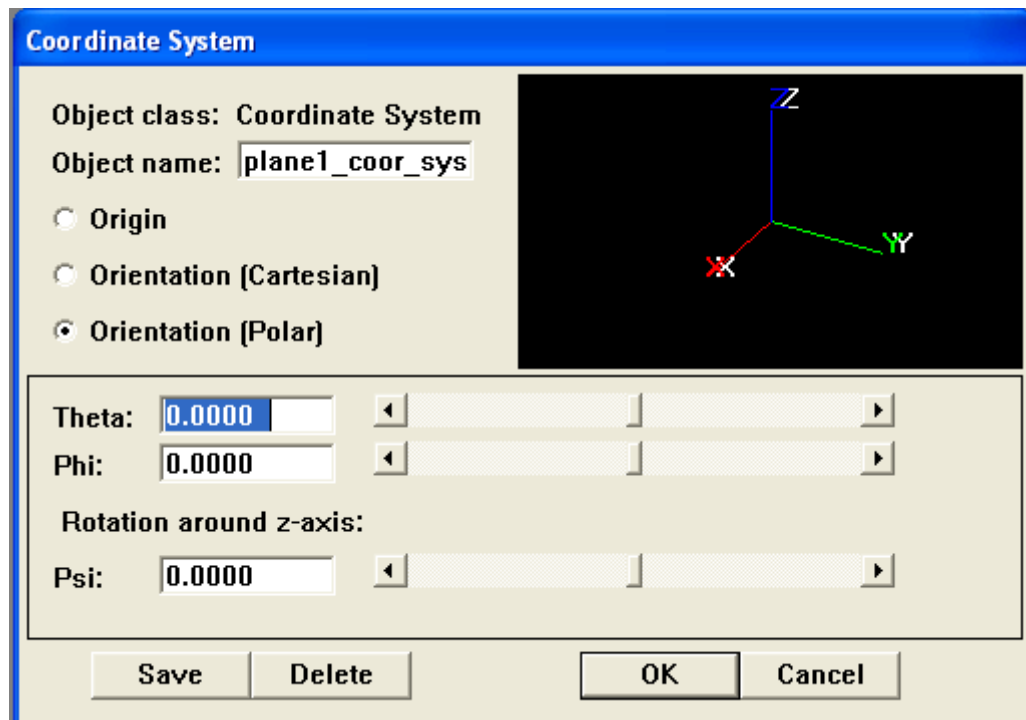


Figura 7.38: Orientación corte 1 diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

Como se ve en las figuras 7.37 y 7.38 el corte se ha situado en el centro del segundo y tercer espejo, justo donde se colocarán las futuras muestras para ser medidas. Con la orientación que se le ha dado al sistema de coordenadas se quiere conseguir que se vea el ancho del haz, es decir, $\omega_{0\ out}$.

El segundo corte es el corte 2 y en este corte se quiere ver la forma que adquiere el haz en el punto de medida. Al igual que para el corte anterior también para este caso hay que definir otro sistema de coordenadas. La situación del sistema de coordenadas será la misma sin embargo la orientación no lo va a ser ya que se desea ver otro plano distinto del haz. Por tanto el corte 2 quedará definido de la siguiente manera:

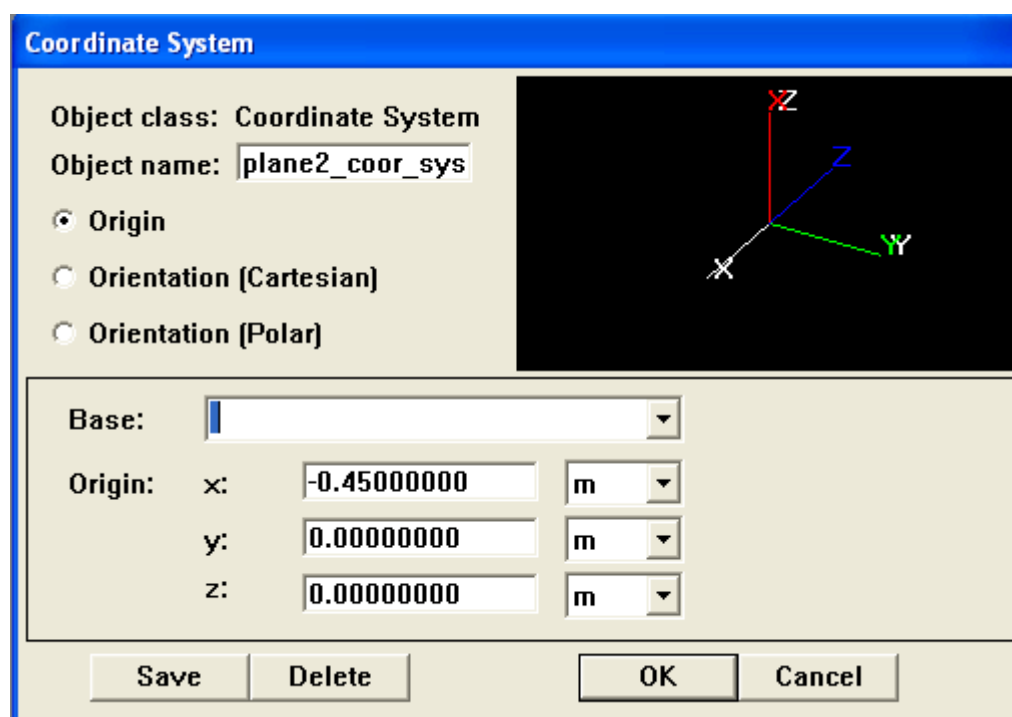


Figura 7.39: Situación corte 2 diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

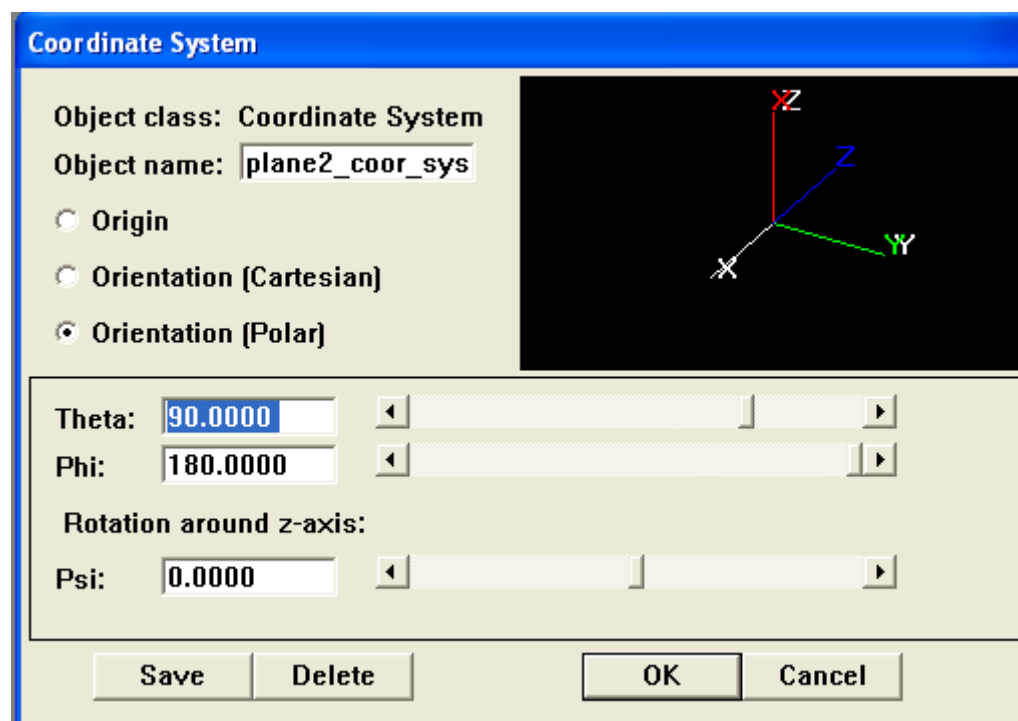


Figura 7.40: Orientación corte 2 diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos

Una vez definidos los sistemas de coordenadas se puede proceder a calcular los resultados para cada uno de los cortes para este último diseño.

Para la frecuencia de trabajo $f=90$ GHz se tienen los siguientes valores:

Corte 1:

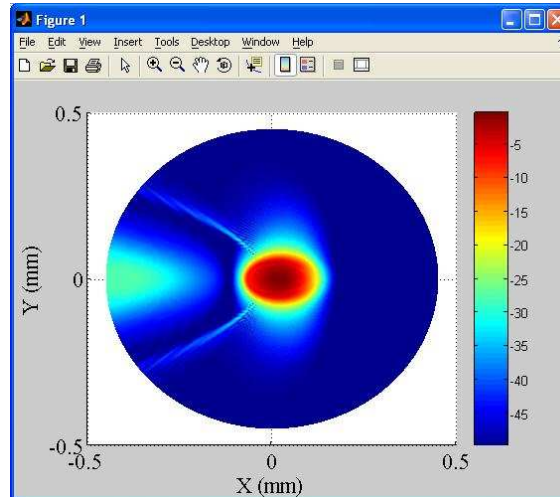


Figura 7.41: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 $f=90$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

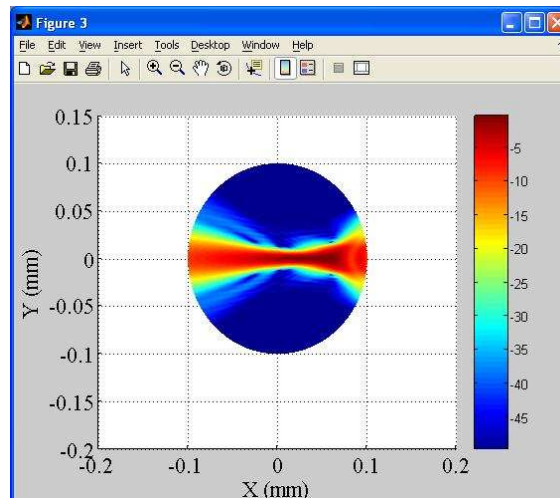


Figura 7.42: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 $f=90$ GHz Antena Ideal

Se ve que para este diseño el corte 1 muestra una imagen con un círculo al igual que para los dos diseños anteriores ya que ese corte no cambia debido a que es el corte perpendicular al rayo, por tanto, sigue representando el valor de $\omega_{0\ out}$. Sin embargo el corte 2 ha cambiado algo con respecto a los diseños anteriores ya que como ya se ha explicado, en este caso no hay enfocamiento ya que se están utilizando espejos parabólicos en lugar de elípticos. Por este motivo, lo que se aprecia en la imagen es la energía tal cual viaja por el diseño sin que haya sido focalizado por este motivo la energía se estrecha mucho menos que en casos anteriores, aunque se sigue apreciando una pequeña focalización ya que este diseño combina espejos

tanto elípticos como parabólicos. Sin embargo, se puede apreciar en la figura 7.42 como la anchura del haz es de casi un orden mayor de magnitud que en casos anteriores.

En posteriores imágenes se verá más claramente como el haz apenas se estrecha.

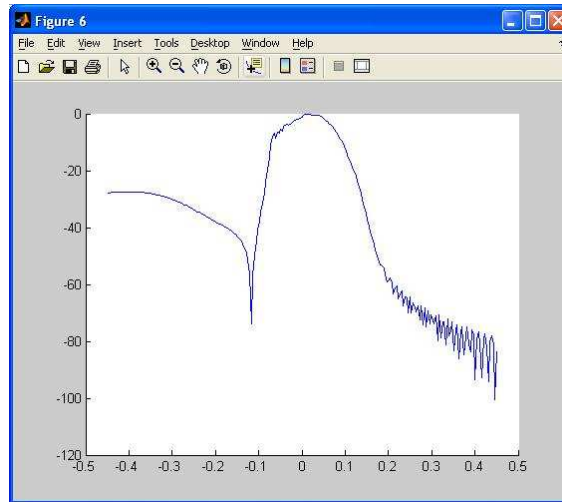


Figura 7.43: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=90$ GHz Antena Ideal

Se ve perfectamente como ahora $\omega_{0\ out}$ tiene valores mucho más grandes.

✚ $f=150$ GHz:

Corte 1:

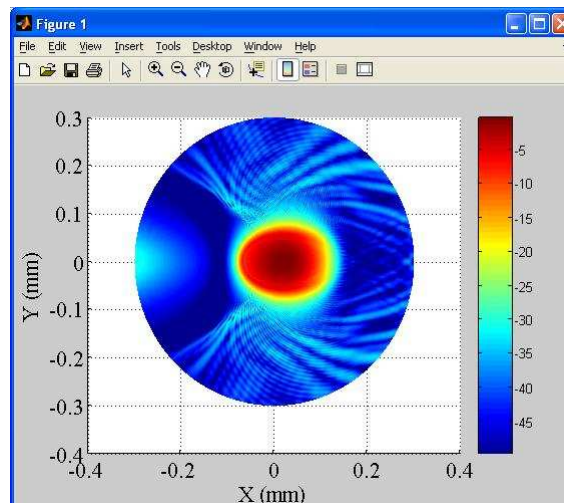


Figura 7.44: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 $f=150$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

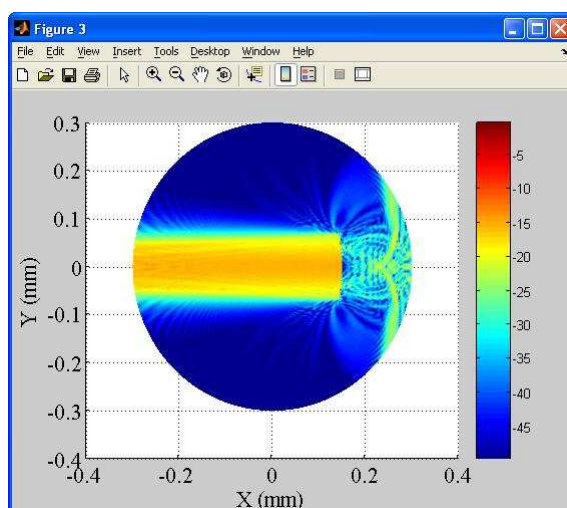


Figura 7.45: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 $f=150$ GHz Antena Ideal

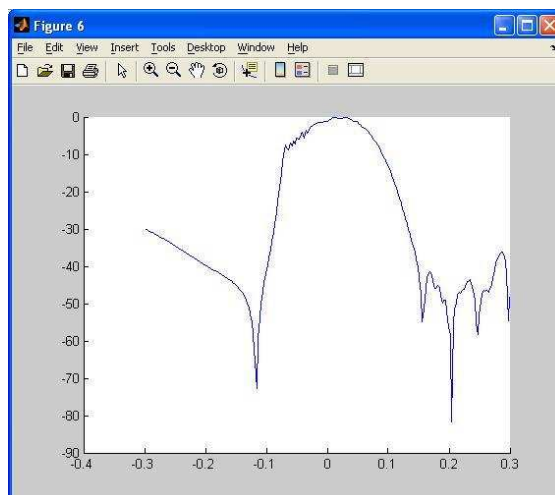



Figura 7.46: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0 \text{ out}}$ $f=150$ GHz Antena Ideal

 $f=220$ GHz:

Corte 1:

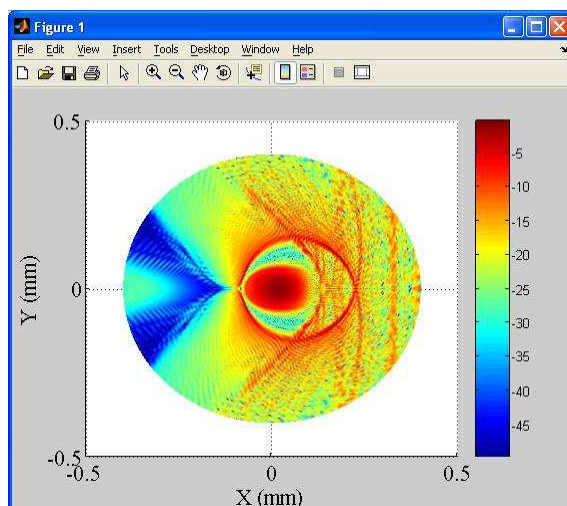


Figura 7.47: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 $f=220$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

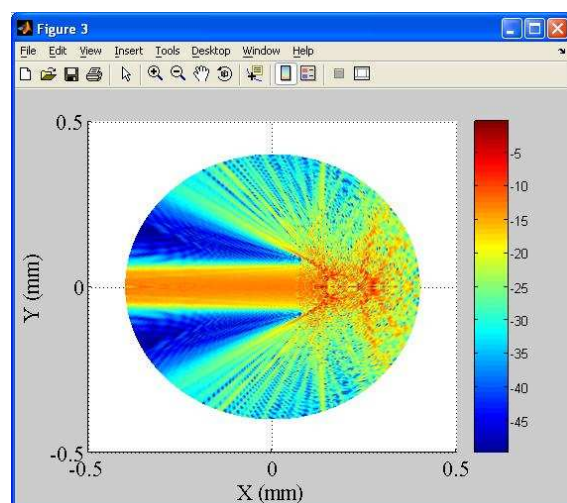


Figura 7.48: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 $f=220$ GHz Antena Ideal

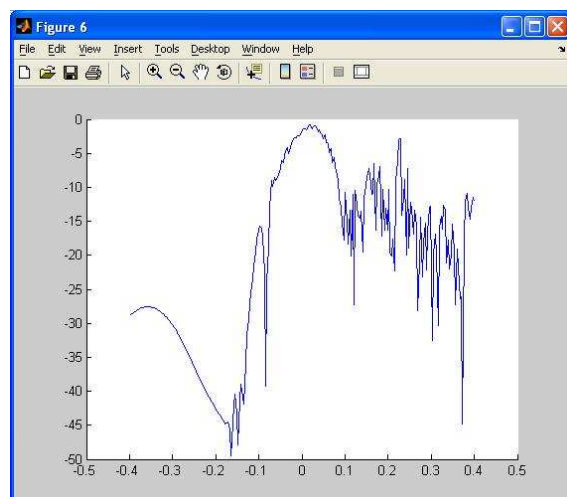


Figura 7.49: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=90$ GHz Antena

$f=500$ GHz:

Corte 1:

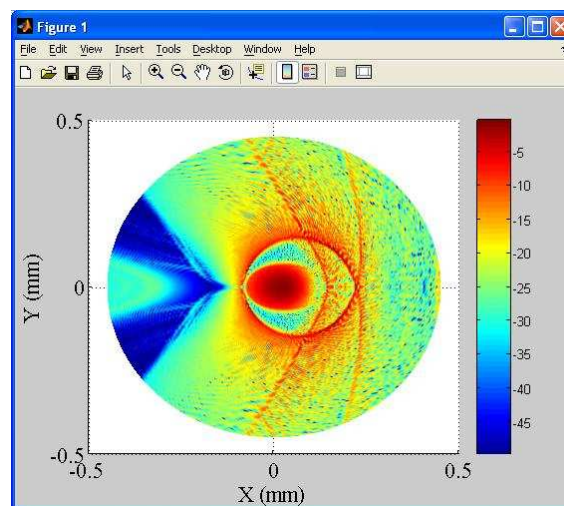


Figura 7.50: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 $f=500$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

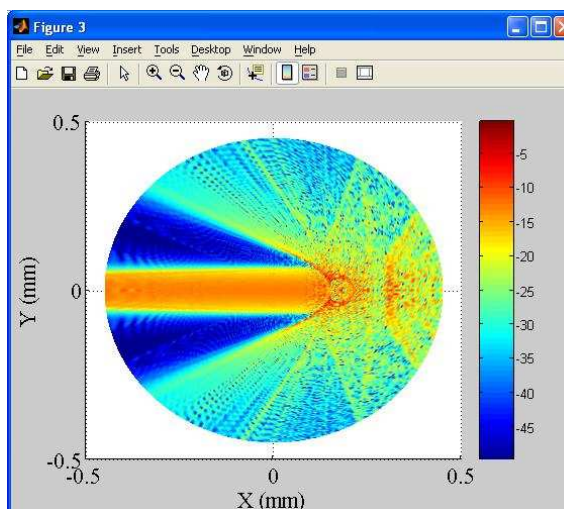


Figura 7.51: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 $f=500$ GHz Antena Ideal

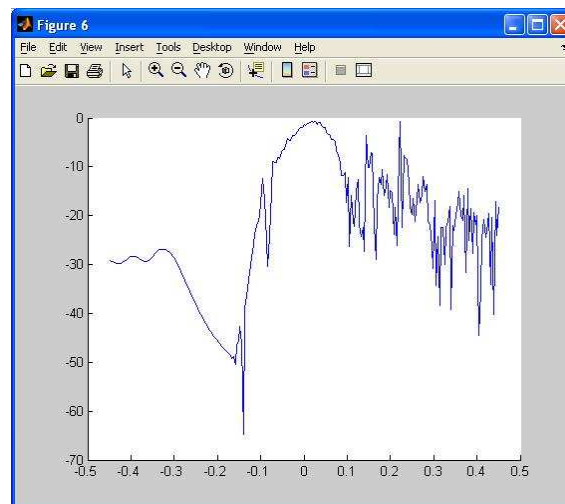


Figura 7.52: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=90$ GHz Antena Ideal

A diferencia de los casos anteriores se observa en las figuras vistas que al ir aumentando la frecuencia la forma de las imágenes no varía considerablemente.

De la misma forma que para los dos diseños anteriores se va a exponer una tabla resumen con los valores calculados teóricamente y de forma simulada a partir de la tercera imagen mostrada anteriormente para cada frecuencia.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

$d_{in}(m)$	$f(GHz)$	ω_{0in}	Punto de medida
			$\omega_{0 out simulada}$
0.15	90	6.3	81.5
0.15	150	3.8	87.5
0.15	220	2.6	85.5
0.15	500	1.1	69.4

TABLA 7.21: Tabla resumen valores $\omega_{0 out}$ diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos Antena Ideal

Ahora se observa, dado que ya no se deseaba con este diseño tener enfocamiento, que el valor ω_{0in} es mucho más pequeño que $\omega_{0 out real}$ ya que para este caso se han utilizado espejos parabólicos. Con lo que el valor de $\omega_{0 out}$ y por tanto la sección que se va a medir, es mucho mayor que antes gracias al uso de espejos parabólicos.

Hasta el momento se ha analizado el punto en el que se medirán las muestras, sin embargo, se pueden analizar muchos más puntos utilizando el software GRASP. Si se tiene en cuenta cómo se han definido los cortes para ese punto de medida, lo único que hay que hacer es definir unos nuevos cortes con las mismas características pero situados en el nuevo lugar a analizar.


Siguiendo esto se ha tomado la decisión de analizar el diseño a la salida del sistema. Se ha hecho esto tanto para el diseño inicial como para los dos diseños importantes de los que trata este proyecto. Dado que es un sistema simétrico a la salida del sistema tendremos prácticamente los mismos resultados, aunque variarán algo los valores simulados, ya que GRASP analiza mediante física óptica la propagación, teniendo en cuenta las reflexiones en los espejos.

Después de analizar todo esto se va a proceder a ver los resultados obtenidos para cada diseño, teniendo en cuenta que los cortes para dichos cálculos se definirían de forma similar dependiendo del diseño y la orientación para cada uno de ellos.

7.2-ANTENA GAUSSIANA A LA SALIDA

7.2.1-DISEÑO INICIAL: DOS ESPEJOS ELÍPTICOS

Al igual que se ha hecho anteriormente se van a calcular estos resultados para las siguientes frecuencias de trabajo: 90 GHz, 150 GHz, 220 GHz y 500 GHz. Por tanto, los resultados obtenidos son los siguientes:

 $f=90$ GHz:

Corte 1:

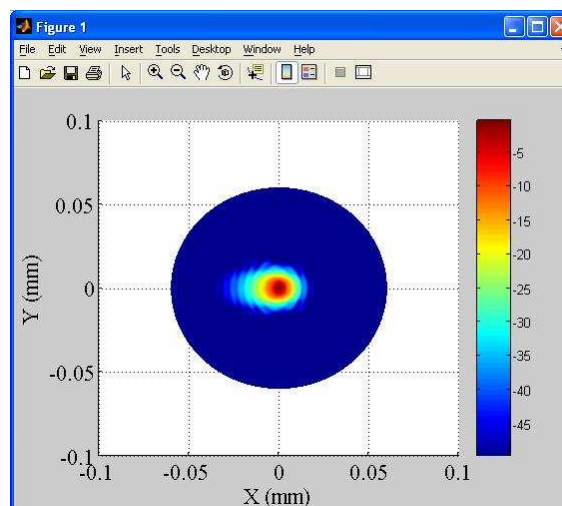


Figura 7.53: Salida 2 espejos elípticos corte 1 $f=90$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

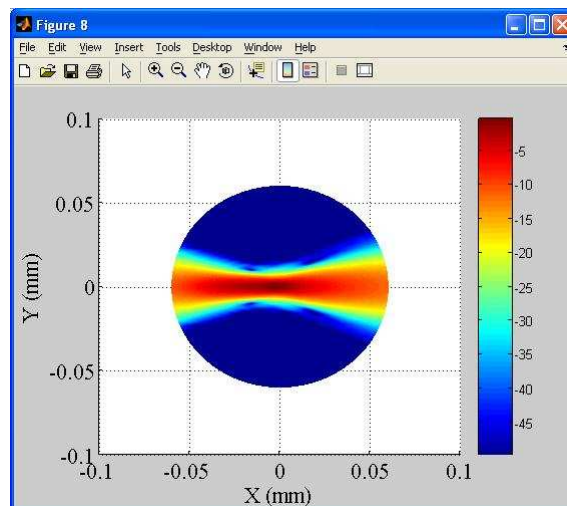


Figura 7.54: Salida 2 espejos elípticos corte 2 $f=90$ GHz Antena Ideal

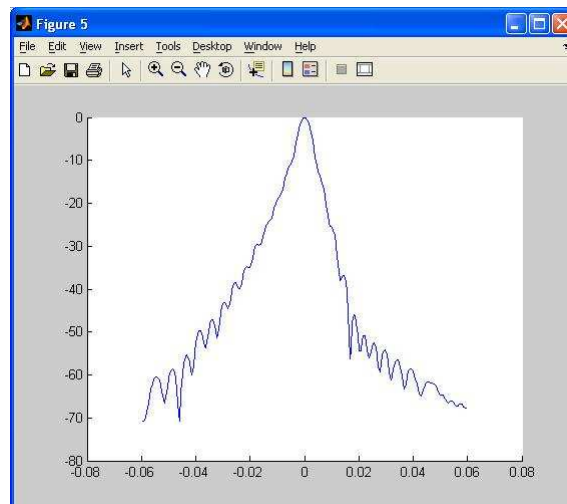



Figura 7.55: Salida 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=90$ GHz Antena Ideal

 $f=150$ GHz:

Corte 1:

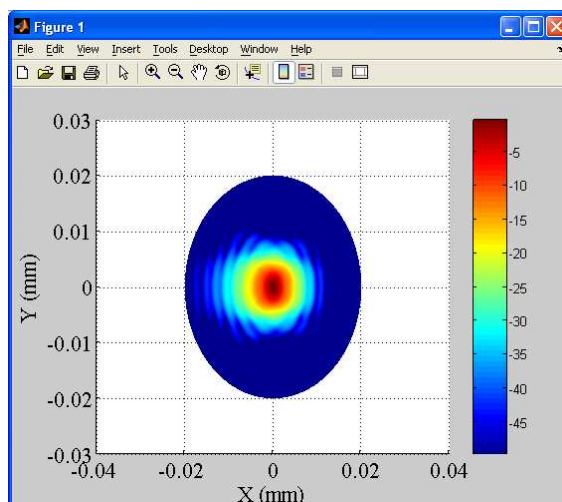


Figura 7.56: Salida 2 espejos elípticos corte 1 $f=150$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

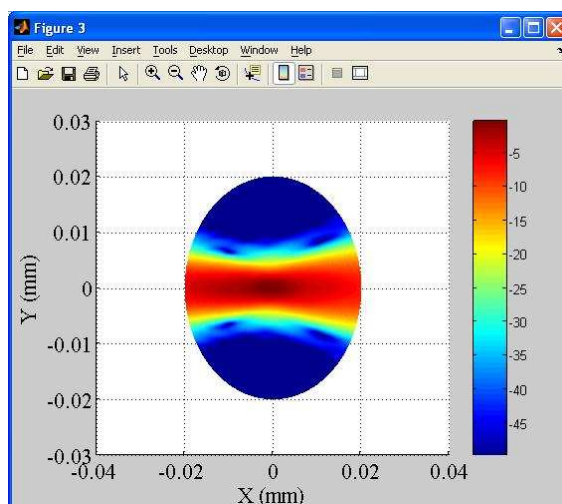


Figura 7.57: Salida 2 espejos elípticos corte 2 $f=150$ GHz Antena Ideal

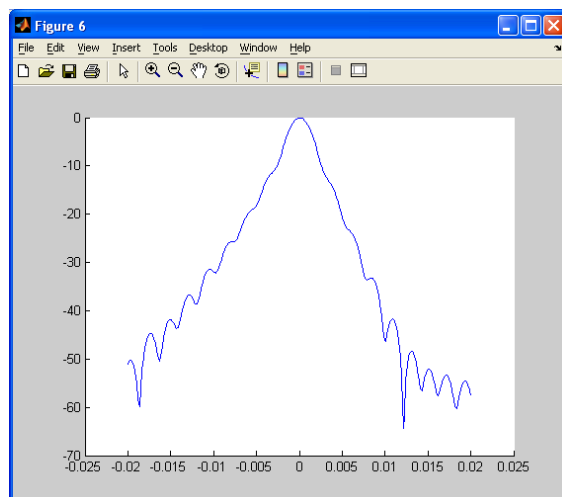


Figura 7.58: Salida 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=150$ GHz Antena Ideal

f=220 GHz:

Corte 1:

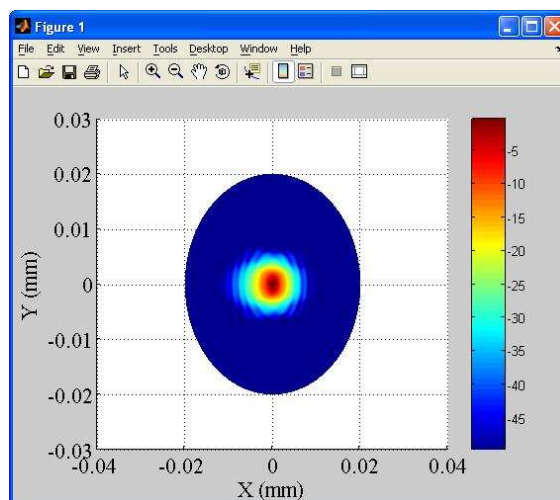


Figura 7.59: Salida 2 espejos elípticos corte 1 f=220 GHz Antena Ideal

Corte 2:

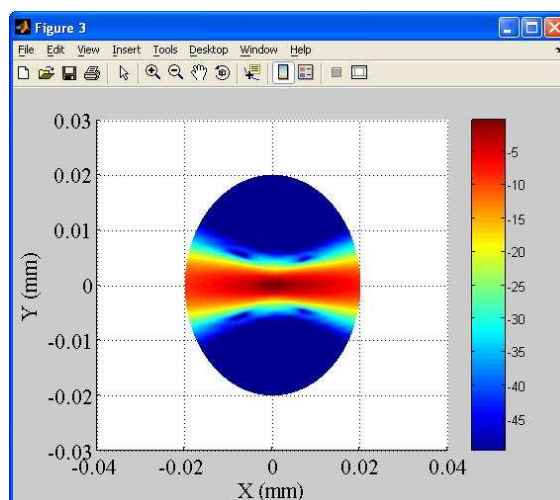


Figura 7.60: Salida 2 espejos elípticos corte 2 f=220 GHz Antena Ideal

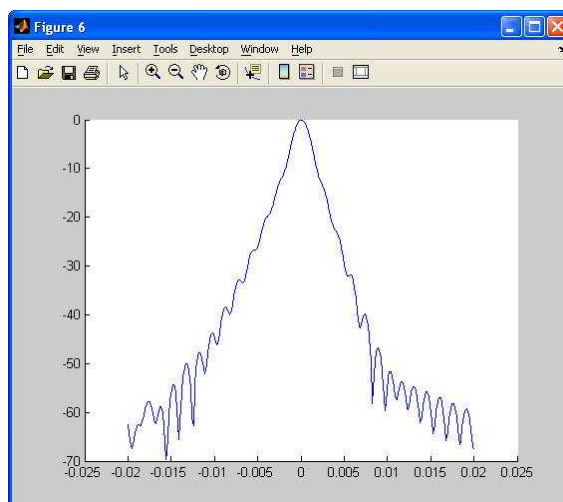



Figura 7.61: Salida 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=220$ GHz Antena Ideal

 $f=500$ GHz:

Corte 1:

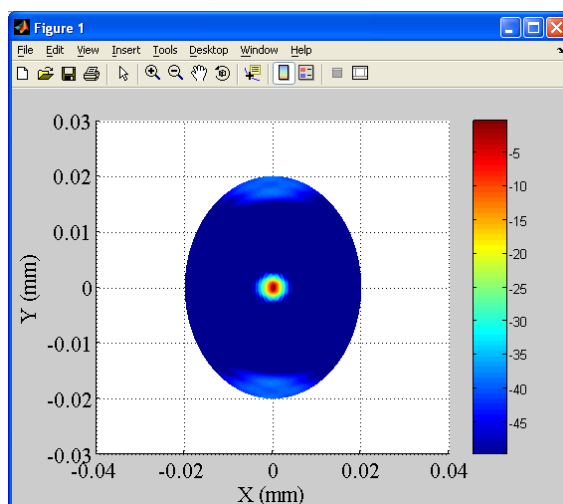


Figura 7.62: Salida 2 espejos elípticos corte 1 $f=500$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

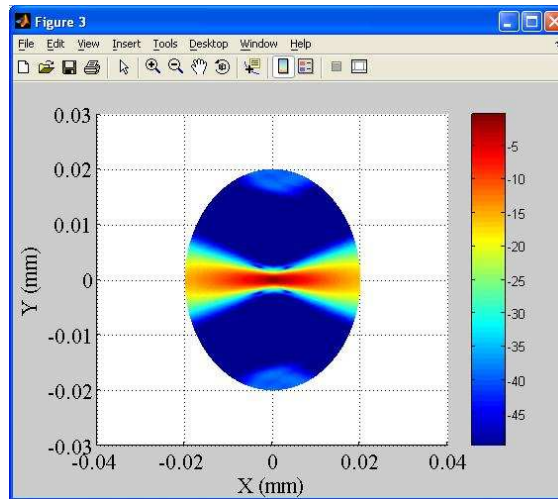


Figura 7.63: Salida 2 espejos elípticos corte 2 $f=500$ GHz Antena Ideal

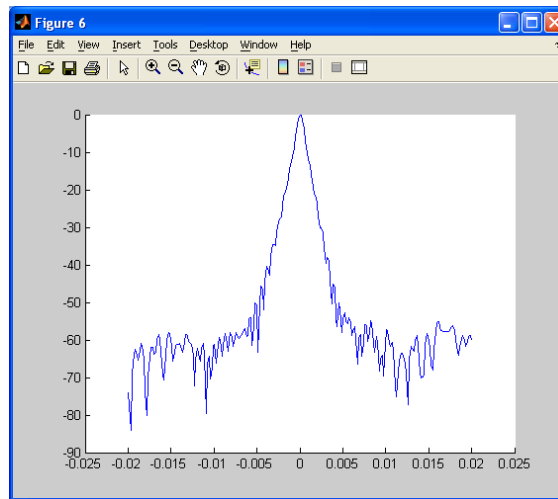


Figura 7.64: Salida 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 \text{ out}}$ $f=500$ GHz Antena Ideal

Como se ha ido viendo en las figuras anteriores, para cada una de las frecuencias las imágenes no varían excesivamente con respecto a las que se tenían para el punto de medida de muestras. Esto es buena señal ya que el diseño tiene la misma estructura en ambos puntos por lo que los resultados deben ser similares. Se ve que las imágenes correspondientes al corte 1 siguen siendo circulares y las correspondientes al corte 2 representan de nuevo un rayo que se estrecha y se ensancha al igual que antes ya que de nuevo, ha vuelto a reflejarse en un espejo elíptico y ha permitido esta focalización al final del diseño.

Se va a mostrar también para los cortes a la salida los valores de $\omega_{0 \text{ out}}$ comparándolos con los calculados antes para el punto de medida de muestras.

$d_{in}(m)$	$f(GHz)$	ω_{0in}	Punto de medida		Salida	
			$\omega_{0 out \text{ calculada}}$	$\omega_{0 out \text{ simulado}}$	$\omega_{0 out \text{ calculada}}$	$\omega_{0 out \text{ simulado}}$
0.15	90	6.3	5.7	4.46	5.3	0.00426
0.15	150	3.8	3.6	2.70	3.5	0.002538
0.15	220	2.6	2.5	1.84	2.5	0.0017
0.15	500	1.1	1.1	0.78	1.1	0.0007

TABLA 7.22: Tabla resumen valores $\omega_{0 out}$ diseño 2 espejos elípticos Antena Ideal


Se observa como los valores varían muy poco reduciéndose algo más y obteniendo por tanto valores de $\omega_{0 out}$ a la salida algo menores. También para este caso los valores de $\omega_{0 out}$ simulados son mejores que los calculados teóricamente. Estos valores se han reducido ya que según la siguiente ecuación:

$$\omega_{0 out} = \frac{\omega_{0 in}}{[(Cd_{in} + D)^2 + C^2 z_c^2]^{0.5}} \quad (7.3)$$

Para calcular el valor de $\omega_{0 out}$ a la salida el valor de $\omega_{0 in}$ que se toma es el valor de $\omega_{0 out}$ que se tenía en el punto de medida (centro del diseño).

7.2.2-DISEÑO CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS

Se va a proceder de la misma manera mostrando los dos cortes calculados a la salida del sistema para cada una de las frecuencias de trabajo. Por tanto, se tendrán los siguientes resultados:

 $f=90 \text{ GHz}$:

Corte 1:

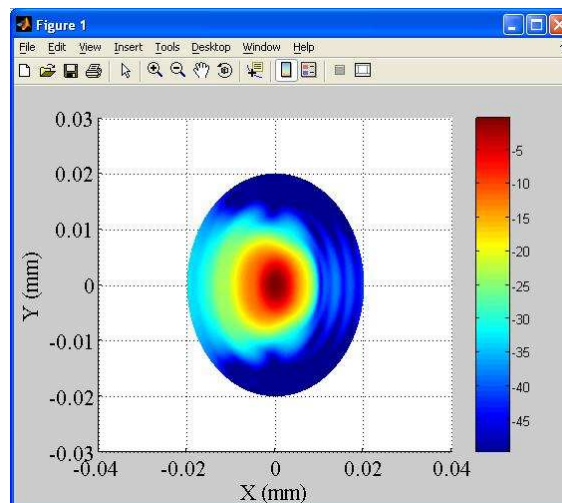


Figura 7.65: Salida 4 espejos elípticos corte 1 $f=90 \text{ GHz}$ Antena Ideal

Corte 2:

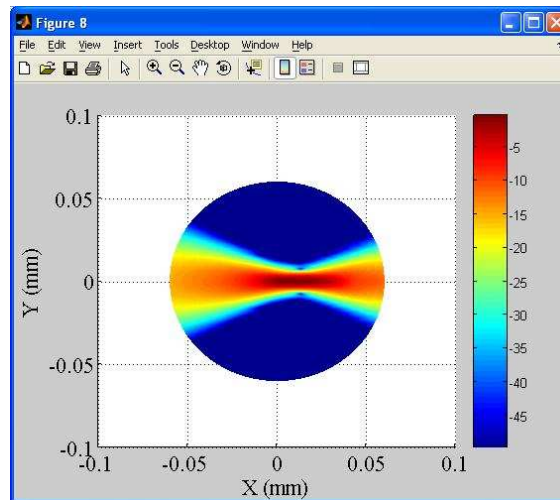


Figura 7.66: Salida 4 espejos elípticos corte 2 $f=90$ GHz Antena Ideal

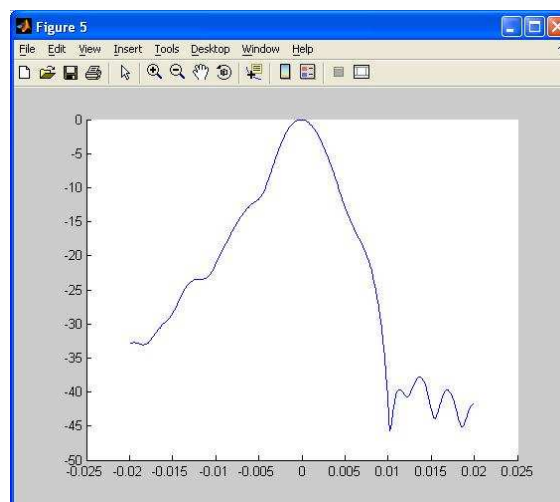



Figura 7.67: Salida 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=90$ GHz Antena Ideal

 $f=150$ GHz:

Corte 1:

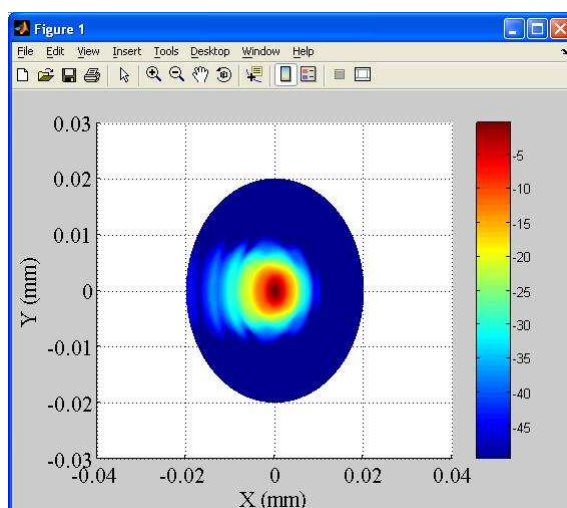


Figura 7.68: Salida 4 espejos elípticos corte 1 $f=150$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

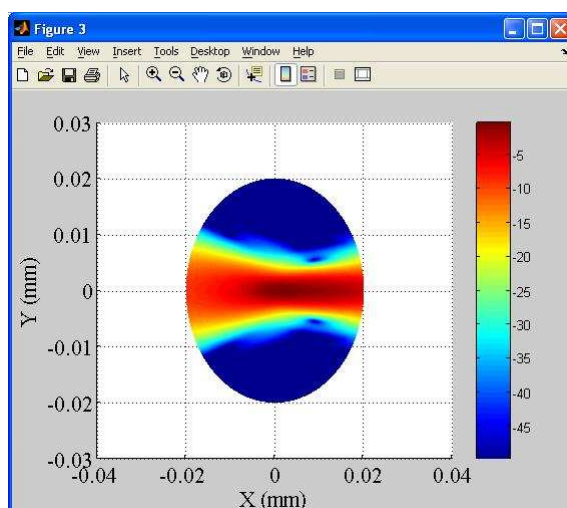


Figura 7.69: Salida 4 espejos elípticos corte 2 $f=150$ GHz Antena Ideal

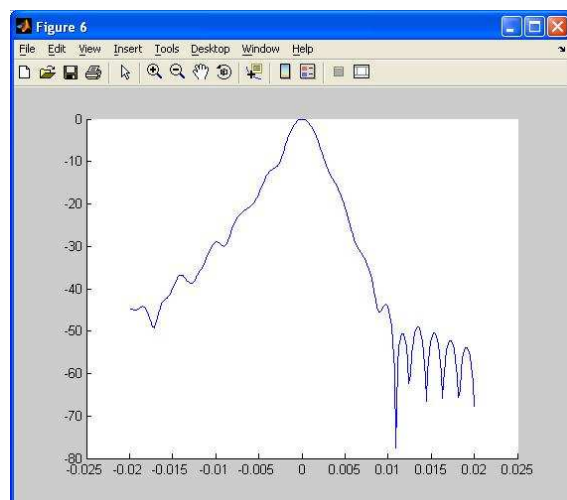


Figura 7.70: Salida 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 \text{ out}}$ $f=150$ GHz Antena Ideal

f=220 GHz:

Corte 1:

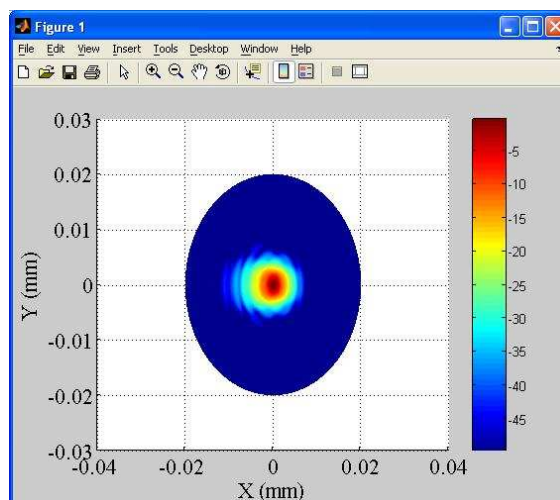


Figura 7.71: Salida 4 espejos elípticos corte 1 f=220 GHz Antena Ideal

Corte 2:

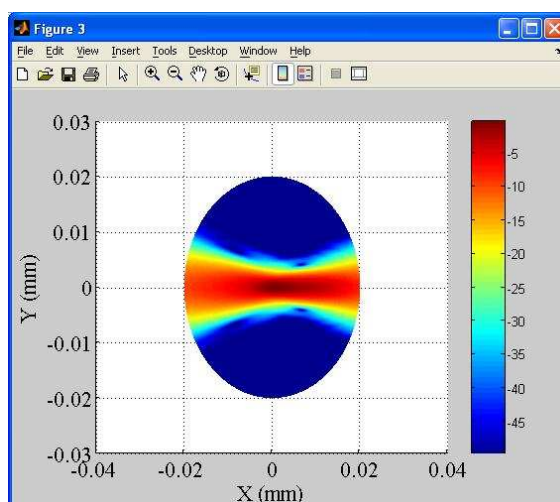


Figura 7.72: Salida 4 espejos elípticos corte 2 f=220 GHz Antena Ideal

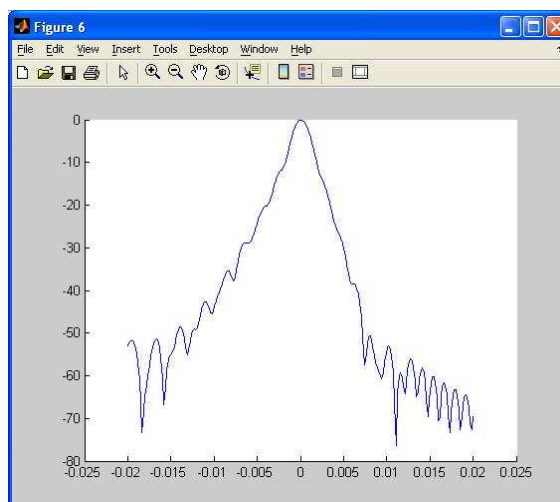



Figura 7.73: Salida 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=220$ GHz Antena Ideal

 $f=500$ GHz:

Corte 1:

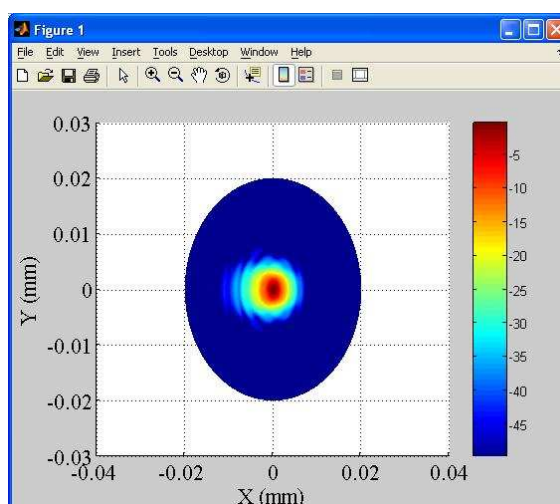


Figura 7.74: Salida 4 espejos elípticos corte 1 $f=500$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

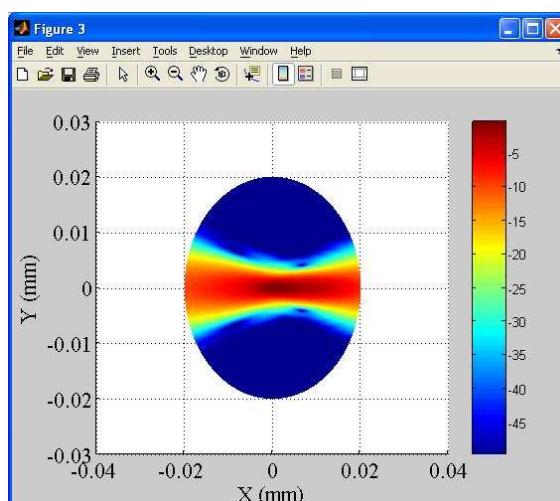


Figura 7.75: Salida 4 espejos elípticos corte 2 $f=500$ GHz Antena Ideal

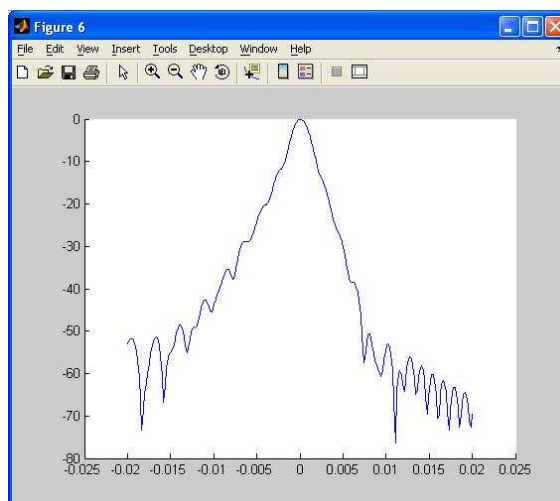


Figura 7.76: Salida 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=500$ GHz Antena Ideal

Al igual que para el diseño anterior se obtienen las mismas conclusiones para los resultados a la salida. Las imágenes siguen manteniendo la misma estructura y los valores para $\omega_{0 out}$ en este caso serán los siguientes:

			Punto de medida		Salida	
$d_{in}(m)$	$f(GHz)$	ω_{0in}	$\omega_{0 out} calculada$	$\omega_{0 out} simulado$	$\omega_{0 out} calculada$	$\omega_{0 out} simulado$
0.15	90	6.3	5.3	4.28	4.4	4.46
0.15	150	3.8	3.5	2.50	2.7	2.60
0.15	220	2.6	2.5	1.70	2.3	1.71
0.15	500	1.1	1.1	0.79	1.1	1.80

TABLA 7.23: Tabla resumen valores $\omega_{0 out}$ diseño 4 espejos elípticos Antena Ideal

Se puede observar que se consiguen mejores resultados que para el caso de sólo dos espejos elípticos.

7.2.3-DISEÑO CUATRO ESPEJOS: DOS ELÍPTICOS Y DOS PARABÓLICOS

De igual manera se calcularán los resultados para este último diseño teniendo en cuenta las cuatro frecuencias elegidas para trabajar y que al utilizar espejos parabólicos las características de este diseño varían algo respecto al diseño que consta solo de espejos elípticos.

✚ f=90 GHz:

Corte 1:

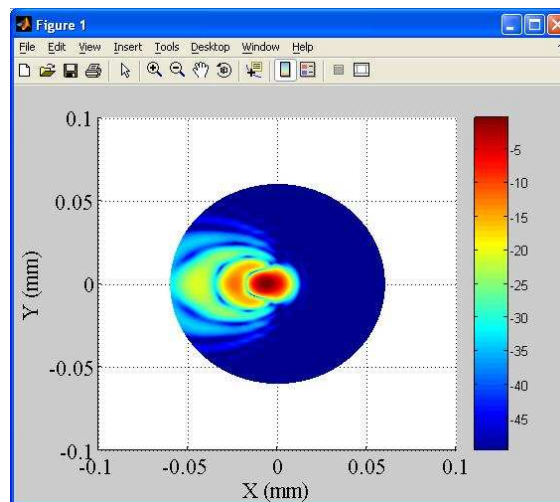


Figura 7.77: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 f=90 GHz Antena Ideal

Corte 2:

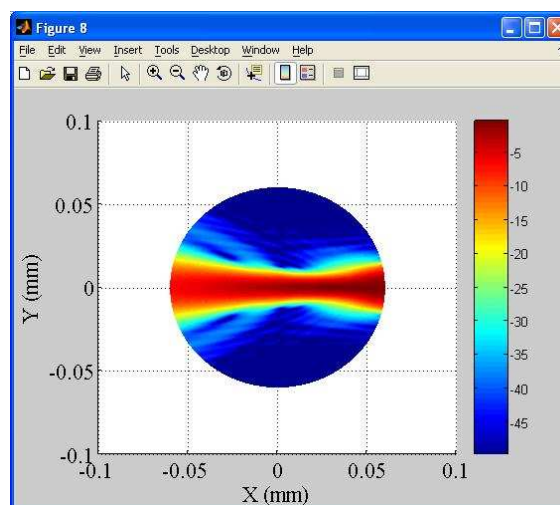


Figura 7.78: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 f=90 GHz Antena Ideal

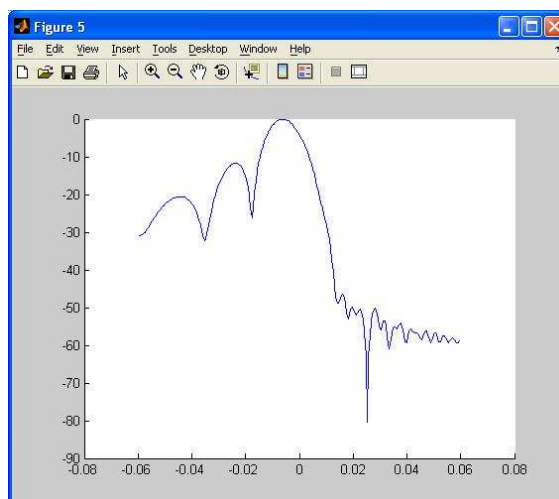


Figura 7.79: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0\ out}$ f=90 GHz Antena Ideal

f=150 GHz:

Corte 1:

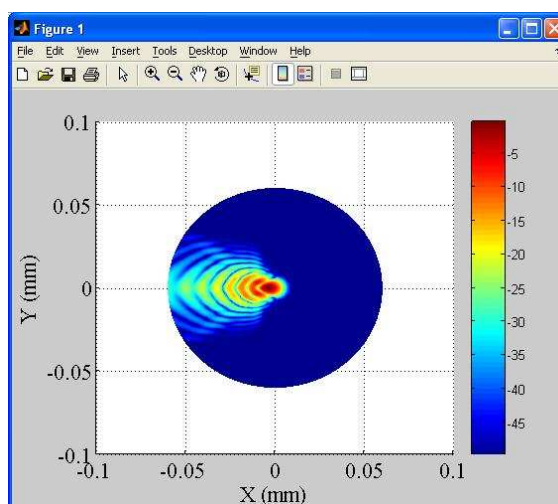


Figura 7.80: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 f=150 GHz Antena Ideal

Corte 2:

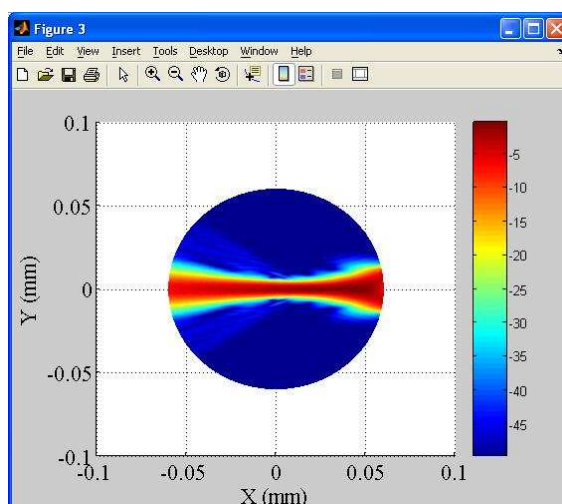


Figura 7.81: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 $f=150$ GHz Antena Ideal

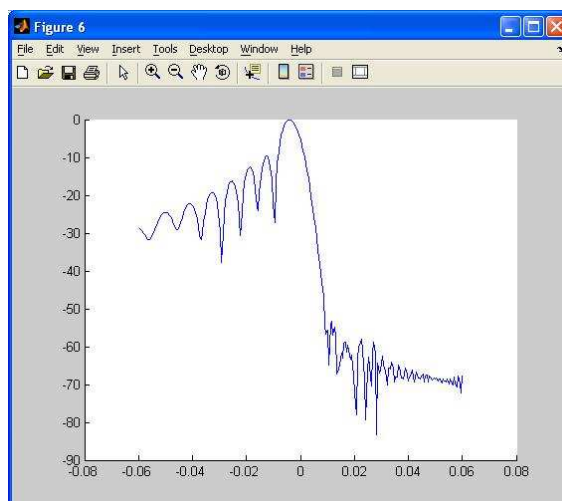



Figura 7.82: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=150$ GHz Antena Ideal

 $f=220$ GHz:

Corte 1:

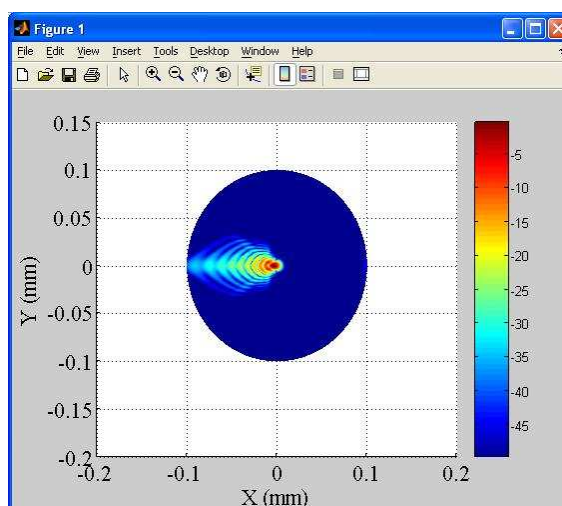


Figura 7.83: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 $f=220$ GHz Antena Ideal

Corte 2:

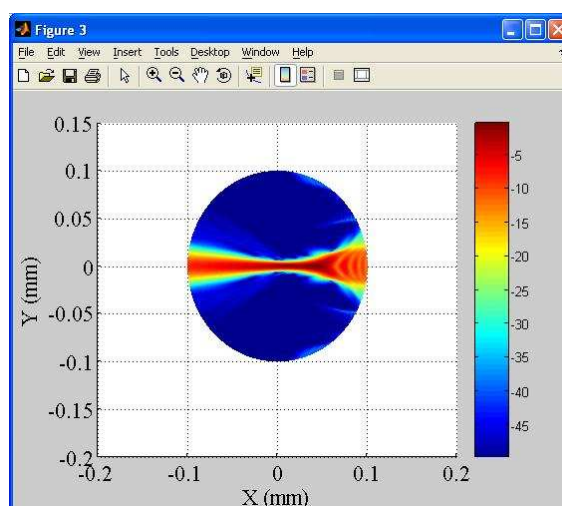


Figura 7.84: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 $f=220$ GHz Antena Ideal

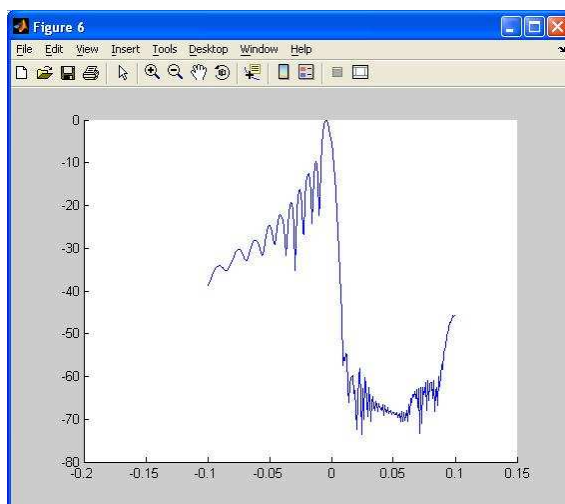


Figura 7.85: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0\ out}$ f=220 GHz Antena Ideal

f=500 GHz:

Corte 1:

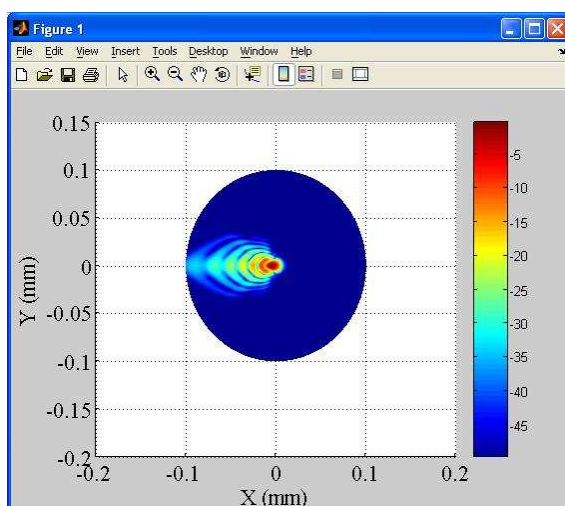


Figura 7.86: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 f=500 GHz Antena Ideal

Corte 2:

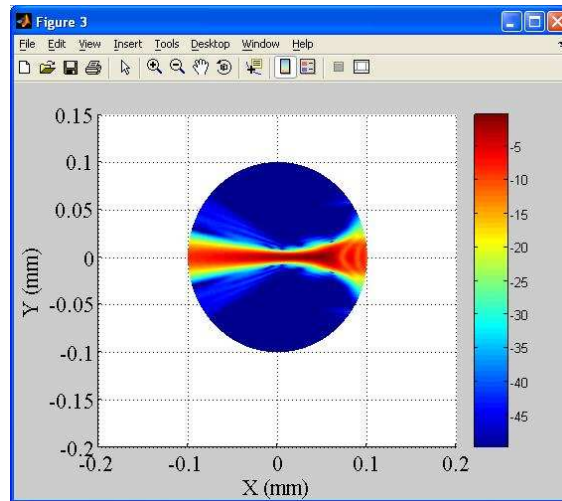


Figura 7.87: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 f=500 GHz Antena Ideal

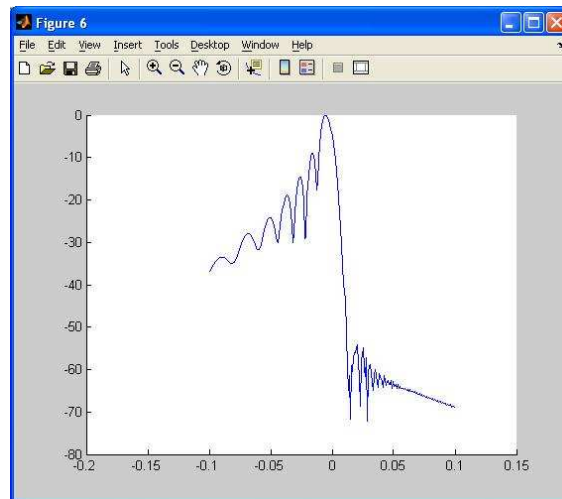


Figura 7.88: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0 out}$ f=500 GHz Antena Ideal

Se aprecia de nuevo como las imágenes obtenidas a la salida para este diseño siguen teniendo la misma forma que tenían en el punto de medida, y con el valor de $\omega_{0 out}$ menor como se ve en la tabla 7.24.

			Punto de medida	Salida
$d_{in}(m)$	f(GHz)	ω_{0in}	$\omega_{0 out \text{ simulado}}$	$\omega_{0 out \text{ simulado}}$
0.15	90	6.3	81.5	12.25
0.15	150	3.8	87.5	7.65
0.15	220	2.6	85.5	7.20
0.15	500	1.1	69.4	7.55

TABLA 7.24: Tabla resumen valores $\omega_{0 out}$ diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos Antena Ideal

Ahora se observa claramente como los valores de $\omega_{0\ out}$ en el punto de medida son mucho mayores que en la salida. Esto es debido a que en el punto de medida el haz procede de un espejo parabólico por lo que no existe focalización. Sin embargo, en la salida el haz se ha reflejado en un espejo elíptico y eso hará que en el foco de dicho espejo, que en el diseño coincide con el punto de salida donde se situará la antena receptora, se concentre la energía.

8-RESULTADOS ANTENA REAL

8.1-DISEÑO ANTENA REAL EN EL PUNTO DE MEDIDA

Una vez hecho los cálculos teóricos para la antena definida en GRASP como Gaussian Feed se va a analizar el sistema de nuevo pero esta vez para el Tabulated Feed. En primer lugar se va a explicar en qué consiste el Tabulated Feed.

El Tabulated Feed está definido según los datos de la antena real que hay en el laboratorio, por lo que los cálculos realizados aplicando esta antena serán más reales que los de la antena Gaussiana ideal que hemos definido antes. Para definir el Tabulated Feed se toman los valores del corte Copolar y Crosspolar y se juntan todos en un único fichero que es al que se llamará cuando se defina el Tabulated Feed.

Los parámetros que se van a introducir para definir el Tabulated Feed además del fichero de entrada son los siguientes:

“Number of cuts”: 20

“Cut_Def”: asymmetric

“Power_norm”: on

“Frequency”: La que se ha definido para el diseño.

“Max_mode_index”: 20

Lo demás valores tendrían el valor que viene por defecto en GRASP.

Una vez explicado esto se va a proceder a ver los resultados que se obtienen de la misma forma que se hizo con la antena Gaussiana.

8.1.1-DISEÑO INICIAL: DOS ESPEJOS ELÍPTICOS

Como se ha realizado anteriormente se crean unos sistemas de coordenadas donde se harán las mediciones de los cortes tanto en la zona de medida de muestras como al final del sistema para ver los resultados obtenidos para esta nueva antena.

También al igual que para la antena Gaussiana se va a calcular la el valor de la potencia que incide en cada espejo y el spill-over que se tiene. Esto se realizará calculando el corte esférico. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Frecuencia	Spill-over			
	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over
90 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9982	0.0076 dB
150 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9983	0.0074 dB
220 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9983	0.0073 dB
500 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9986	0.0060 dB


TABLA 8.1: Relación Rim vs Spill-over diseño 2 espejos elípticos Antena Real

Se observa de la tabla anterior que la potencia que llega a los espejos en cualquiera de las frecuencias es de casi el 100% y que el spill-over es prácticamente despreciable.

Comparando los resultados con los obtenidos utilizando la antena Gaussiana se observa que ahora se tienen valores de potencia mayores y el spill-over es menor. Se puede ver que incluso en el segundo espejo se tiene prácticamente la totalidad de la potencia a pesar de espacio recorrido. Antes los valores de potencia que llegaban al segundo espejo rondaban el 97% y ahora es de más del 99% por lo que se ha ganado bastante al utilizar esta antena.

Una vez visto cuanta potencia llega a cada uno de los espejos y haber calculado el spill-over se va a proceder a ver los resultados del diseño tanto en el punto de medida de las muestras como al final del sistema como se hizo en el caso anterior con la antena Gaussiana. Los cortes que se van a utilizar son los mismos que se utilizaron anteriormente.

Se va a proceder ahora a ver cada uno de los cortes para el diseño del sistema del que se está tratando ahora para cada una de las frecuencias de trabajo: 90 GHz, 150 GHz, 220 GHz y 500 GHz.

 $f = 90 \text{ GHz}$:

Corte 1:

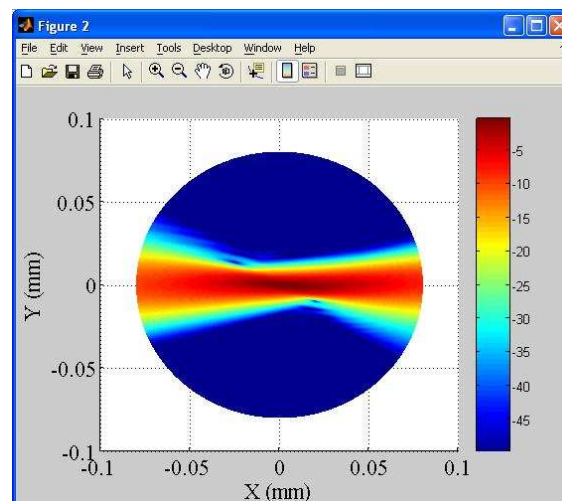


Figura 8.1: Centro 2 espejos elípticos corte 1 $f=90 \text{ GHz}$ Antena Real

Corte 2:

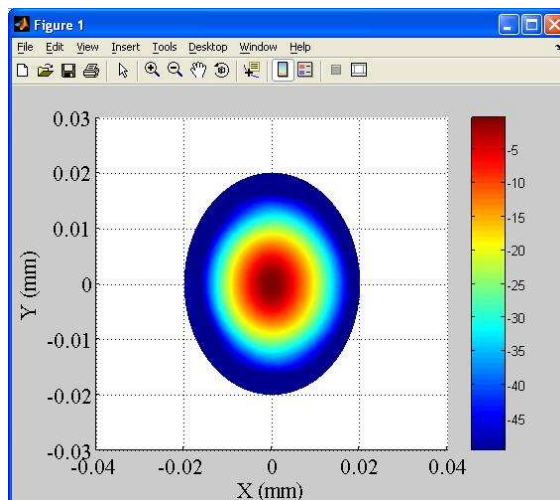


Figura 8.2: Centro 2 espejos elípticos corte 2 $f=90$ GHz Antena Real

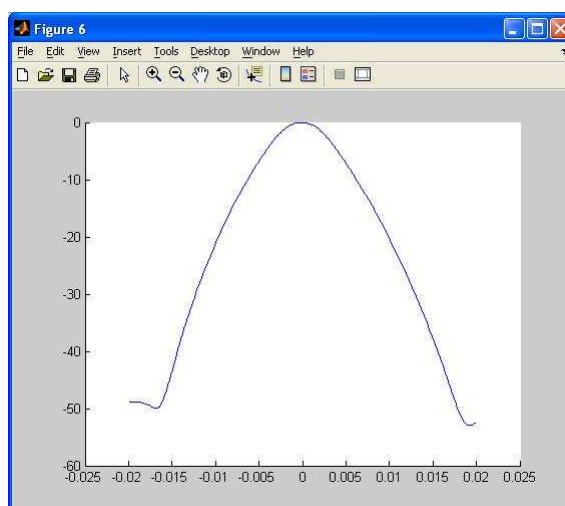



Figura 8.3: Centro 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=90$ GHz Antena Real

 $f=150$ GHz:

Corte 1:

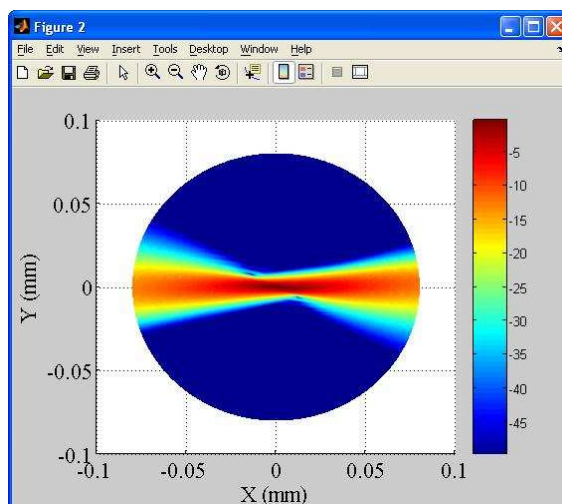


Figura 8.4: Centro 2 espejos elípticos corte 1 $f=150$ GHz Antena Real

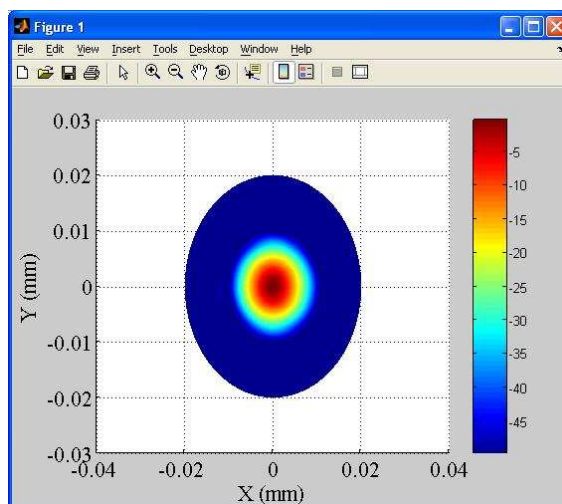


Figura 8.5: Centro 2 espejos elípticos corte 2 $f=150$ GHz Antena Real

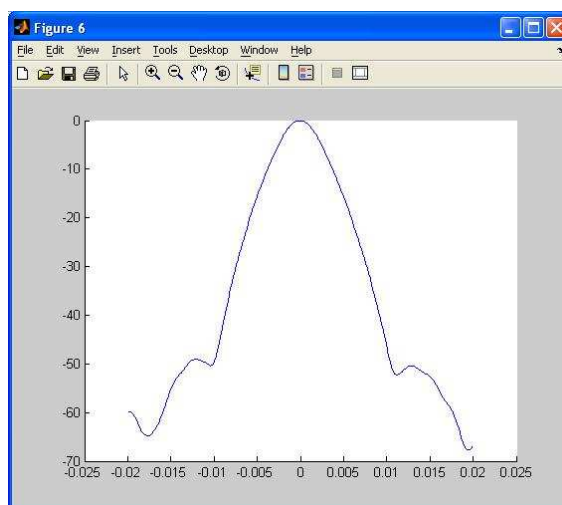


Figura 8.6: Centro 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=150$ GHz Antena Real

$f = 220$ GHz:

Corte 1:

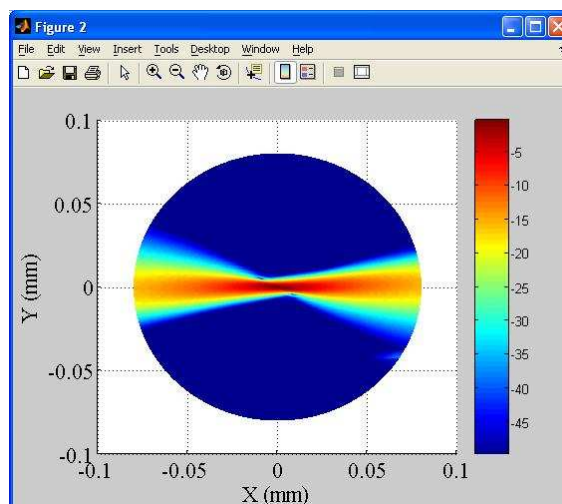


Figura 8.7: Centro 2 espejos elípticos corte 1 $f=220$ GHz Antena Real

Corte 2:

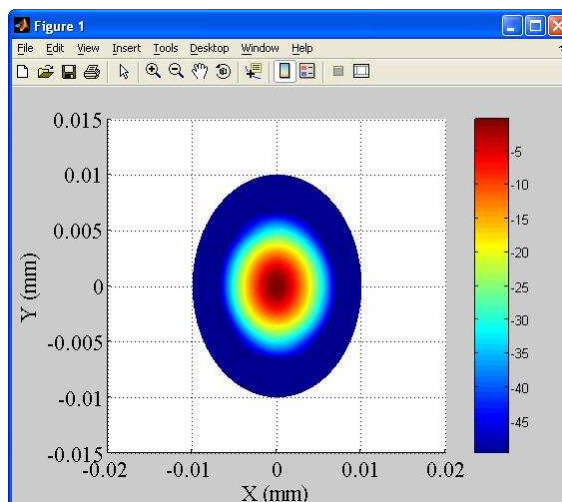


Figura 8.8: Centro 2 espejos elípticos corte 2 $f=220$ GHz Antena Real

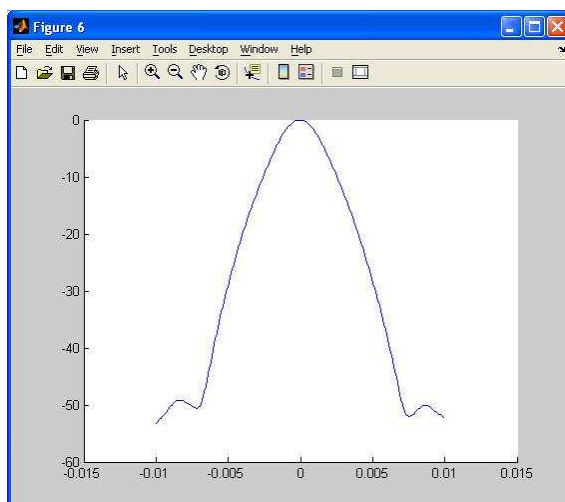


Figura 8.9: Centro 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=220$ GHz Antena Real

$f= 500$ GHz:

Corte 1:

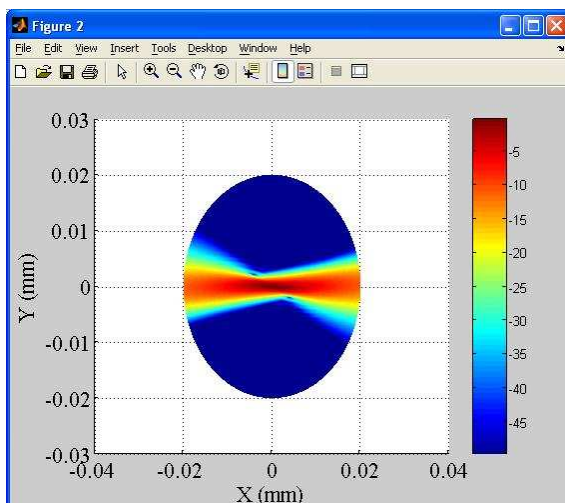


Figura 8.10: Centro 2 espejos elípticos corte 1 $f=500$ GHz Antena Real

Corte 2:

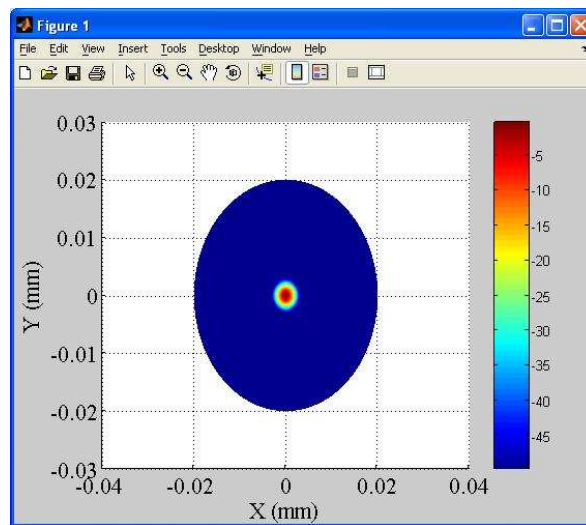


Figura 8.11: Centro 2 espejos elípticos corte 2 $f=500$ GHz Antena Real

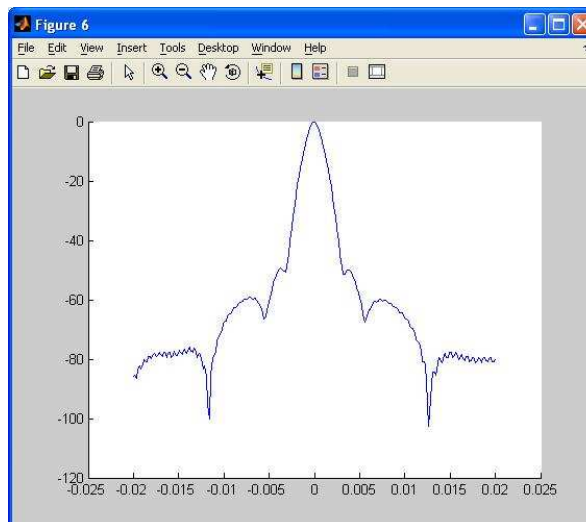


Figura 8.12: Centro 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 \text{ out}}$ $f=500$ GHz Antena Real

Las figuras obtenidas para esta nueva antena siguen el mismo patrón que las obtenidas para la antena Gaussiana con la diferencia de que ahora la potencia está más concentrada en el punto de medida (0,0) en las imágenes correspondientes al corte 2 y las relativas al corte 1 están más definidas y se ve mejor la forma que va tomando el haz al viajar por el sistema.

A continuación se muestran los valores de $\omega_{0 \text{ out}}$ para cada una de las frecuencias de trabajo de este diseño:



			Punto de medida	
$d_{in}(m)$	$f(GHz)$	ω_{0in}	$\omega_{0 out_calculada}$	$\omega_{0 out_simulado}$
0.15	90	6.3	5.7	6.3
0.15	150	3.8	3.6	3.8
0.15	220	2.6	2.5	2.6
0.15	500	1.1	1.1	1.2

TABLA 8.2: Tabla resumen valores $\omega_{0 out}$ diseño 2 espejos elípticos Antena Real

El valor de $\omega_{0 out}$ disminuye al aumentar la frecuencia al igual que para la antena Gaussiana. Pero los valores han aumentado algo respecto a los teóricos. De hecho ahora son más próximos.



8.1.2-DISEÑO CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS

Como se ha hecho para el sistema anterior para este otro sistema con cuatro espejos elípticos también se va a calcular el valor de la potencia que llega a cada espejo así como el spill-over del sistema. Para ello se va a realizar de nuevo una tabla que muestre estos valores para cada una de las frecuencias de trabajo seleccionadas.

Frecuencia	Spill-over							
	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
90 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9982	0.0076 dB	0.9964	0.0156 dB	0.9915	0.0372 dB
150 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9983	0.0074 dB	0.9979	0.0090 dB	0.9975	0.0109 dB
220 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9983	0.0073 dB	0.9980	0.0085 dB	0.9978	0.0097 dB
500 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9986	0.0060 dB	0.9982	0.0079 dB	0.9982	0.0076 dB

TABLA 8.3: Relación Rim vs Spill-over diseño 4 espejos elípticos Antena Real

Se puede observar en la tabla anterior que incluso en el cuarto espejo la potencia que llega a él es más del 99 % para cada una de las frecuencias y que el valor del spill-over es despreciable. Con respecto a la antena Gaussiana los valores que se tienen ahora han mejorado bastante ya que anteriormente se tenía que la potencia era de alrededor del 96 % y por tanto un spill-over mayor.

Una vez analizada la potencia y spill-over que existe en cada espejo se va a analizar la forma del haz en cada uno de los cortes que se han hecho en el punto de medida de muestras. Con esto se calculará también el valor de $\omega_{0\ out}$ en ese punto.

Por tanto, se tiene lo siguiente para cada una de las frecuencias de trabajo elegidas.

f= 90 GHz:

Corte 1:

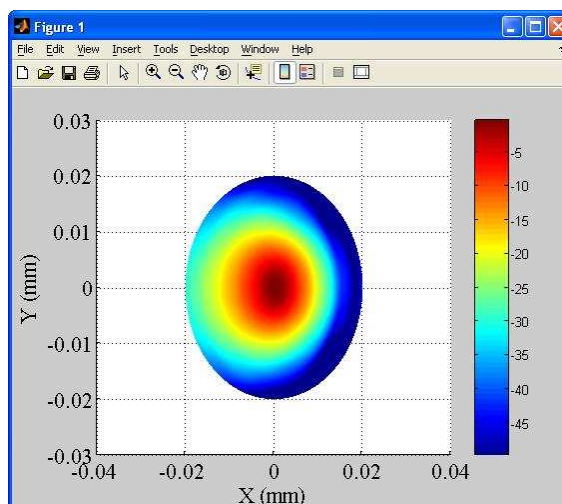


Figura 8.13: Centro 4 espejos elípticos corte 1 f=90 GHz Antena Real

Corte 2:

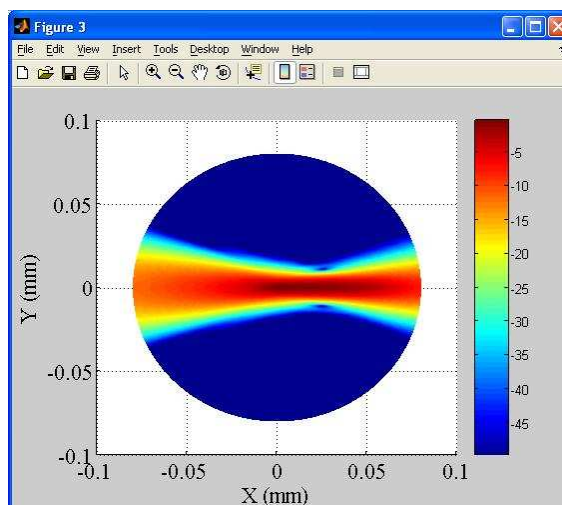


Figura 8.14: Centro 4 espejos elípticos corte 2 f=90 GHz Antena Real

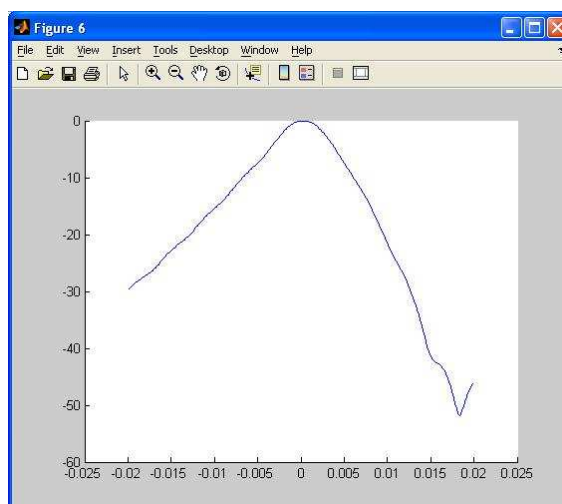


Figura 8.15: Centro 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=90$ GHz Antena Real

$f=150$ GHz:

Corte 1:

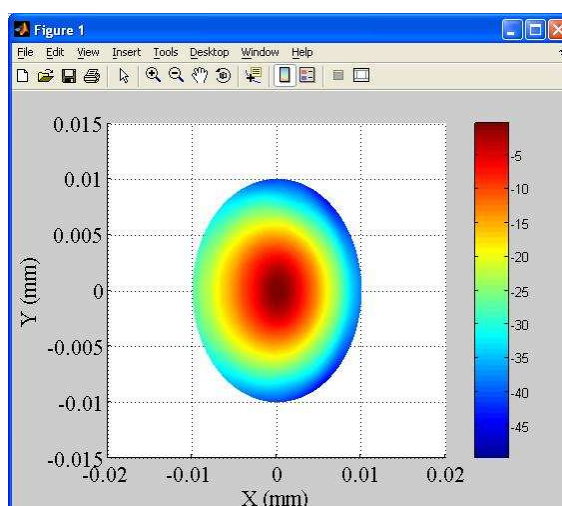


Figura 8.16: Centro 4 espejos elípticos corte 1 $f=150$ GHz Antena Real

Corte 2:

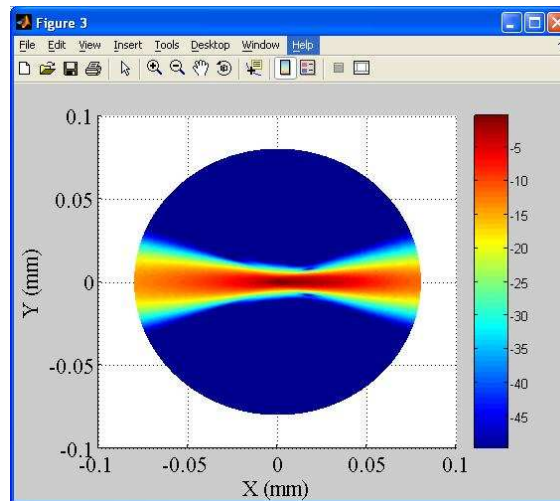


Figura 8.17: Centro 4 espejos elípticos corte 2 $f=150$ GHz Antena Real

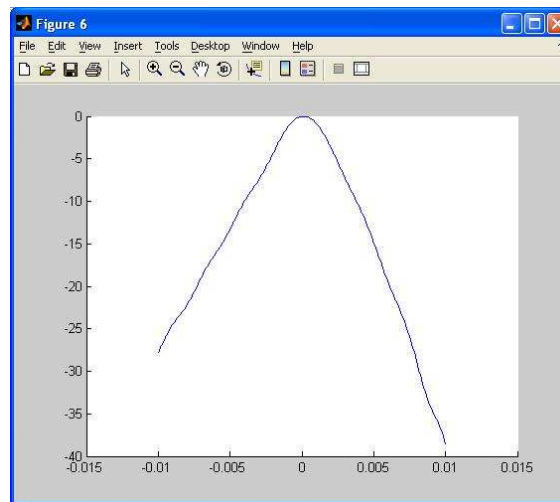



Figura 8.18: Centro 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=150$ GHz Antena Real

 $f=220$ GHz:

Corte 1:

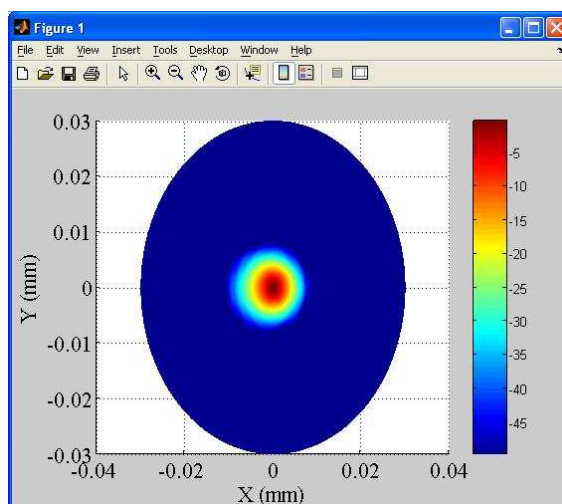


Figura 8.19: Centro 4 espejos elípticos corte 1 $f=220$ GHz Antena Real

Corte 2:

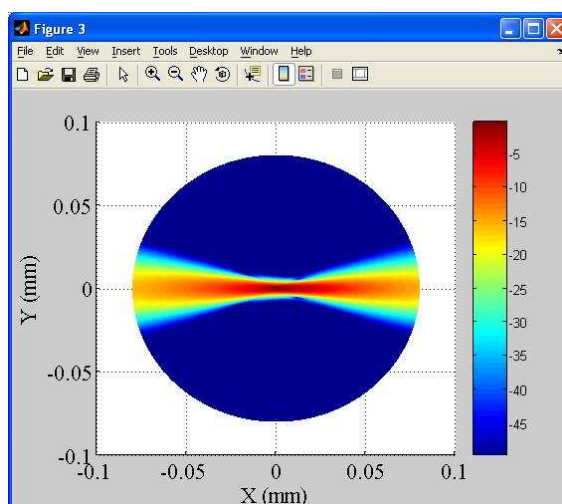


Figura 8.20: Centro 4 espejos elípticos corte 2 $f=220$ GHz Antena Real

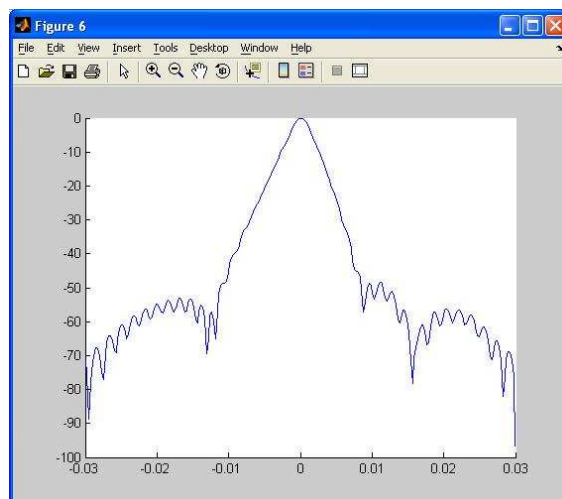


Figura 8.21: Centro 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=220$ GHz Antena Real

f=500 GHz:

Corte 1:

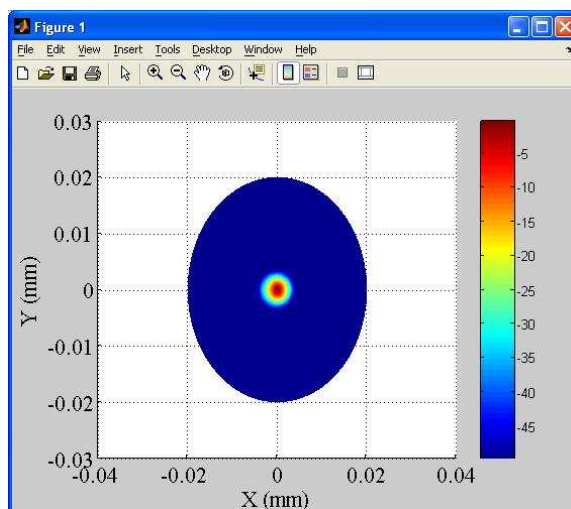


Figura 8.22: Centro 4 espejos elípticos corte 1 f=500 GHz Antena Real

Corte 2:

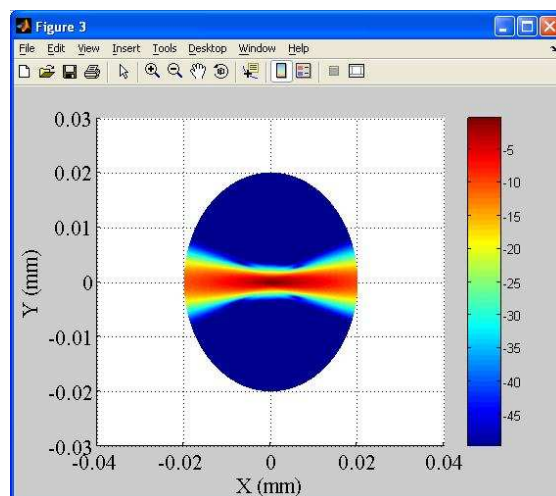


Figura 8.23: Centro 4 espejos elípticos corte 2 f=500 GHz Antena Real

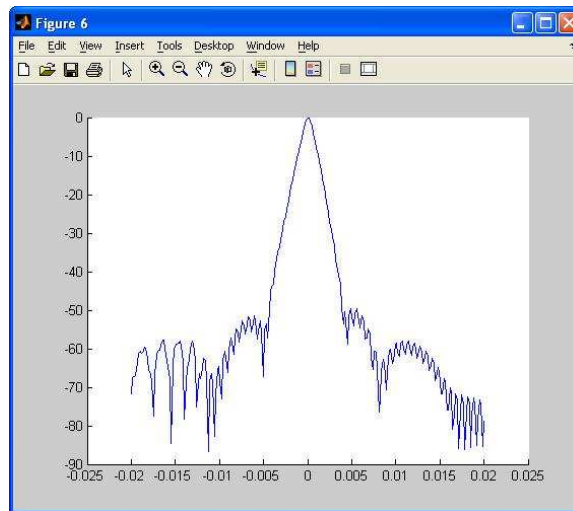


Figura 8.24: Centro 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=500$ GHz Antena Real

De igual forma que se ha comentado para el caso de dos espejos elípticos los resultados para este diseño son más claros y tienen mayor concentración de potencia que para el caso de la antena Gaussiana.

De nuevo se tiene que los valores para $\omega_{0\ out}$ son los siguientes:

$d_{in}(m)$	$f(GHz)$	ω_{0in}	Punto de medida	
			$\omega_{0\ out\ calculada}$	$\omega_{0\ out\ simulado}$
0.15	90	6.3	5.3	5.60
0.15	150	3.8	3.5	3.40
0.15	220	2.6	2.5	2.40
0.15	500	1.1	1.1	1.03

TABLA 8.4: Tabla resumen valores $\omega_{0\ out}$ diseño 4 espejos elípticos Antena Real

Los valores de $\omega_{0\ out}$ son prácticamente los mismos para el caso teórico que para el simulado.



8.1.3-DISEÑO CUATRO ESPEJOS: DOS ELÍPTICOS Y DOS PARABÓLICOS

Al igual que para el caso anterior se va a calcular el valor de la potencia que llega a cada espejo así como el spill-over del sistema comparando los resultados con los conseguidos para la antena Gaussiana. Para ello se va a realizar de nuevo una tabla que muestre estos valores para cada una de las frecuencias de trabajo seleccionadas.

Frecuencia	Spill-over							
	Potencia relativa en el espejo 1	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 2	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 3	Spill-over	Potencia relativa en el espejo 4	Spill-over
90 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9541	0.2041 dB	0.9455	0.2433 dB	0.9404	0.2667 dB
150 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9571	0.1906 dB	0.9509	0.2188 dB	0.9477	0.2333 dB
220 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9578	0.1870 dB	0.9526	0.2110 dB	0.9502	0.2218 dB
500 GHz	0.9994	0.0024 dB	0.9584	0.1846 dB	1.0381	-0.1623 dB	0.9652	0.1537 dB

TABLA 8.5: Relación Rim vs Spill-over diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos Antena Real

Se puede observar de nuevo en la tabla superior que la potencia que llega al cuarto espejo es también para este caso muy alta teniendo un valor en torno al 94% que llega hasta el 96% dependiendo de la frecuencia que se elija. El valor del spill-over es mayor que para los otros dos diseños que utilizan esta antena real pero sigue siendo muy pequeño. Con respecto a la antena Gaussiana los valores que se tienen ahora han mejorado mucho ya que anteriormente se tenía que la potencia era de alrededor del 74 % y con un spill-over mucho mayor. Por tanto se puede concluir que este estudio realizado con un Tabulated Feed con los parámetros de una antena real del laboratorio, da unos resultados mucho más satisfactorios.

Una vez analizada la potencia y spill-over que existe en cada espejo se va a analizar la forma que hay en cada uno de los cortes que se han hecho en el punto de medida de muestras. Con esto se calculará también el valor de $\omega_{0\ out}$ en ese punto.

Por tanto, se tiene lo siguiente para cada una de las frecuencias de trabajo elegidas.

f=90 GHz:

Corte 1:

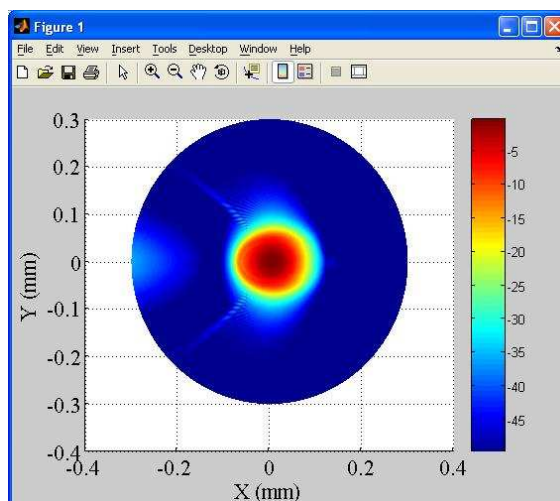


Figura 8.25: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 f=90 GHz Antena Real

Corte 2:

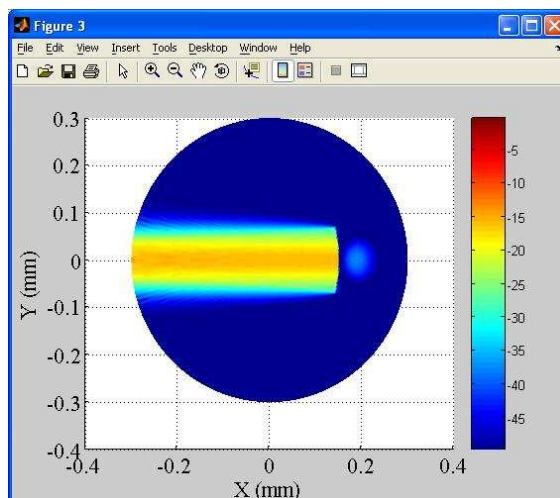


Figura 8.26: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 f=90 GHz Antena Real

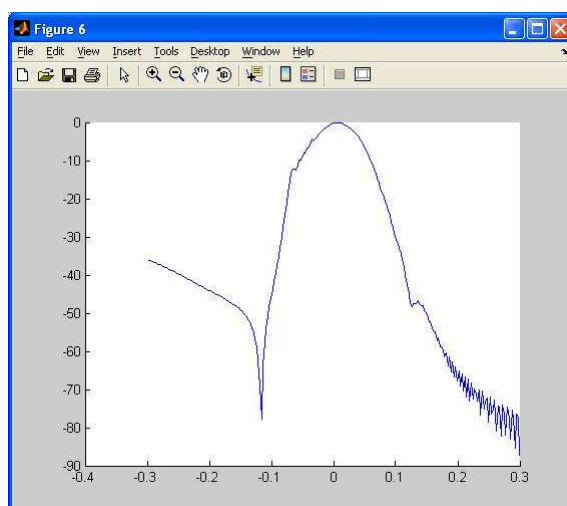



Figura 8.27: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=90$ GHz Antena Real

 $f=150$ GHz:

Corte 1:

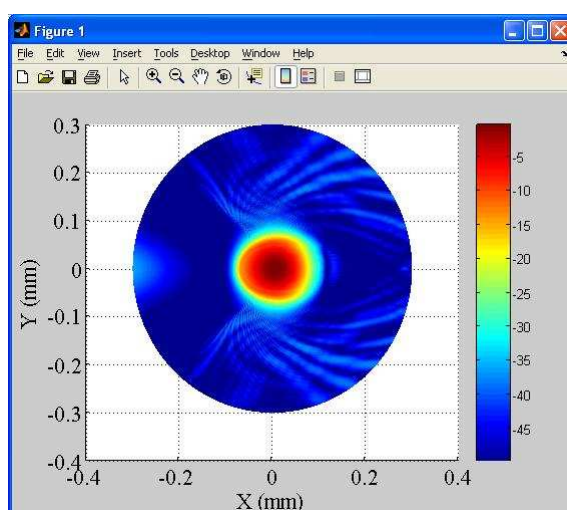


Figura 8.28: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 $f=150$ GHz Antena Real

Corte 2:

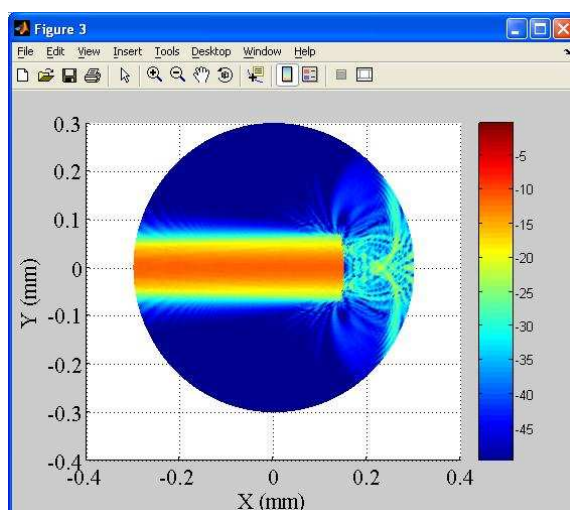


Figura 8.29: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 $f=150$ GHz Antena Real

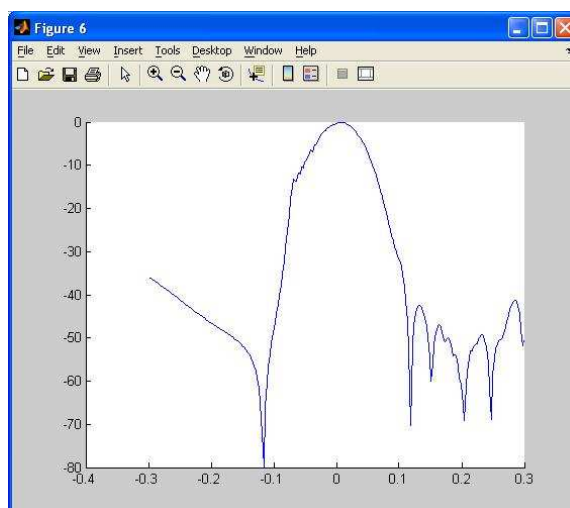


Imagen 8.30: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=150$ GHz Antena Real

$f=220$ GHz:

Corte 1:

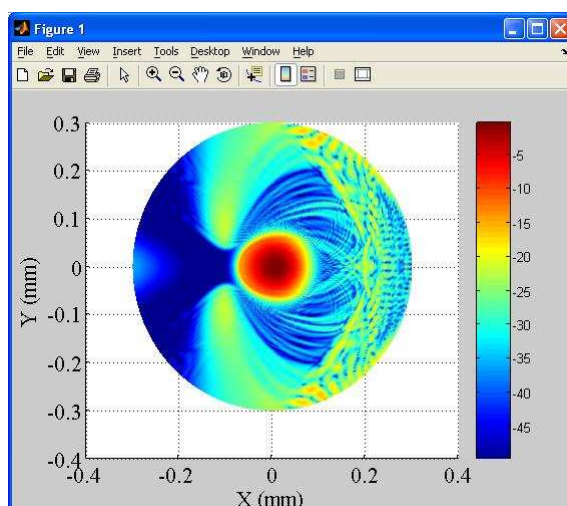


Figura 8.31: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 $f=220$ GHz Antena Real

Corte 2:

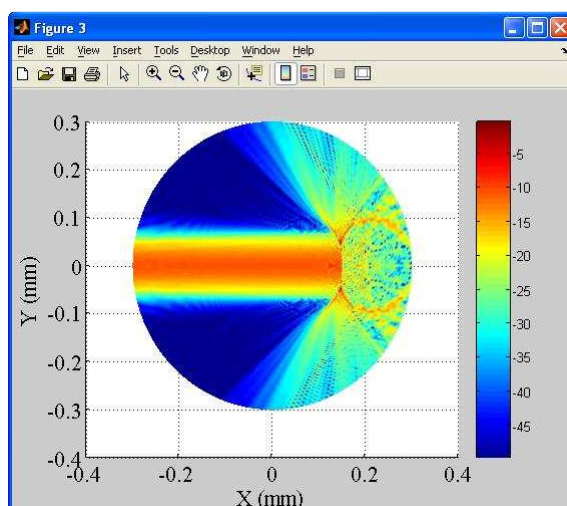


Figura 8.32: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 $f=220$ GHz Antena Real

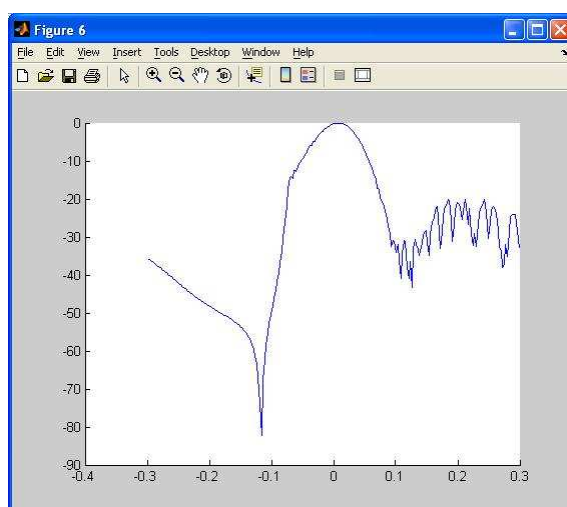


Figura 8.33: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo ω_0_{out} $f=220$ GHz Antena Real

f=500 GHz:

Corte 1:

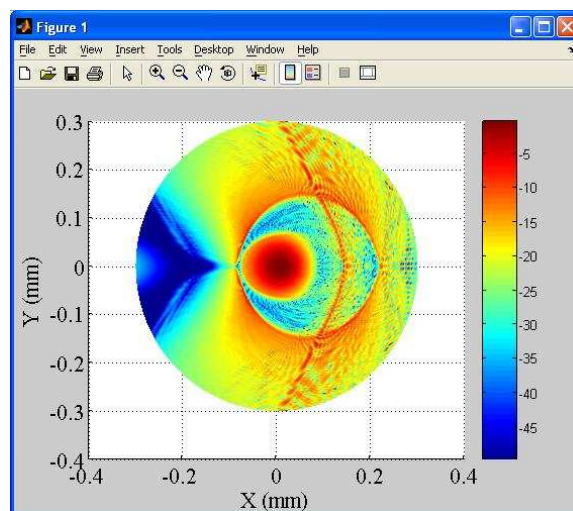


Figura 8.34: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 f=500 GHz Antena Real

Corte 2:

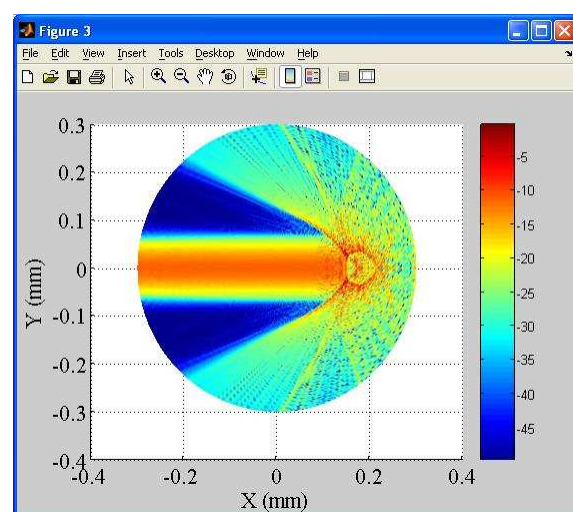


Figura 8.35: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 f=500 GHz Antena Real

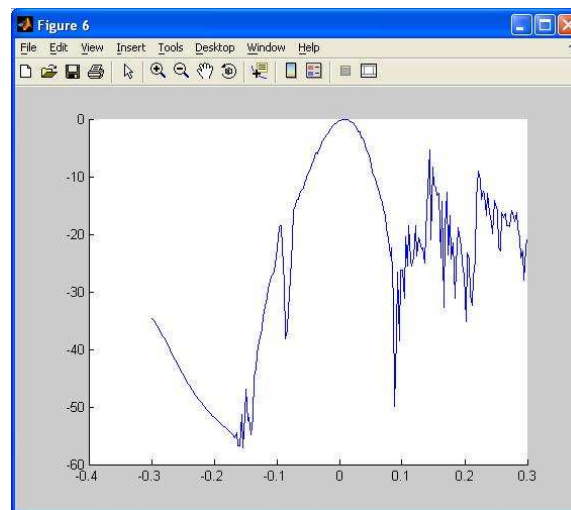


Figura 8.36: Centro 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=500$ GHz Antena Real

Como ocurría en los dos diseños descritos ya, para este último los resultados obtenidos siguen la misma dinámica. Son similares a los obtenidos para la antena Gaussiana.

Para este último diseño los valores que se obtienen de $\omega_{0 out}$ son los que se muestran en la siguiente tabla:

			Punto de medida
$d_{in}(m)$	$f(GHz)$	ω_{0in}	$\omega_{0 out \text{ simulado}}$
0.15	90	6.3	58.8
0.15	150	3.8	58.5
0.15	220	2.6	57.8
0.15	500	1.1	56.3


TABLA 8.6: Tabla resumen valores $\omega_{0 out}$ diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos Antena Real

Estos valores obtenidos para $\omega_{0 out}$ son mucho mayores que los que se tienen a la entrada al igual que ocurría para el caso de la antena Gaussiana ya que se están utilizando espejos parabólicos.

8.2-ANTENA REAL A LA SALIDA

Una vez hecho esto se va a calcular lo mismo pero este caso a la salida del sistema para poder observar como es dicho diseño y si su comportamiento es el esperado. Por tanto, se va a tener de nuevo los dos cortes para cada uno de los distintos sistemas diseñados a cada una de las frecuencias de trabajo.

8.2.1-DISEÑO INICIAL: DOS ESPEJOS ELÍPTICOS

 $f=90$ GHz:

Corte 1:

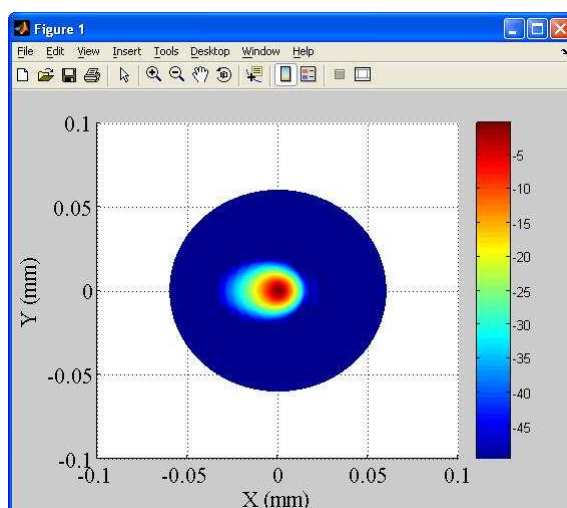


Figura 8.37: Salida 2 espejos elípticos corte 1 $f=90$ GHz Antena Real

Corte 2:

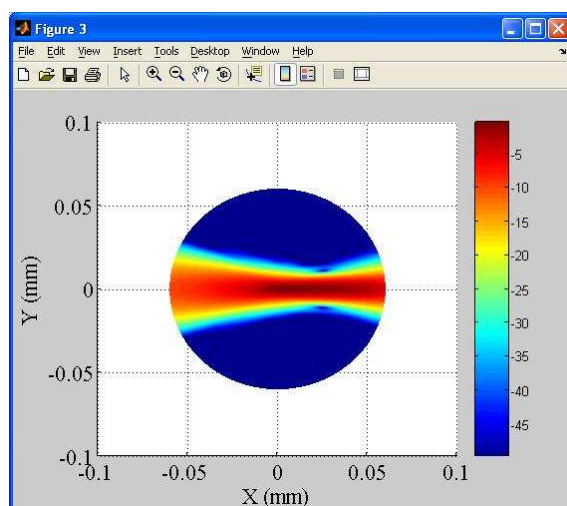


Figura 8.38: Salida 2 espejos elípticos corte 2 $f=90$ GHz Antena Real

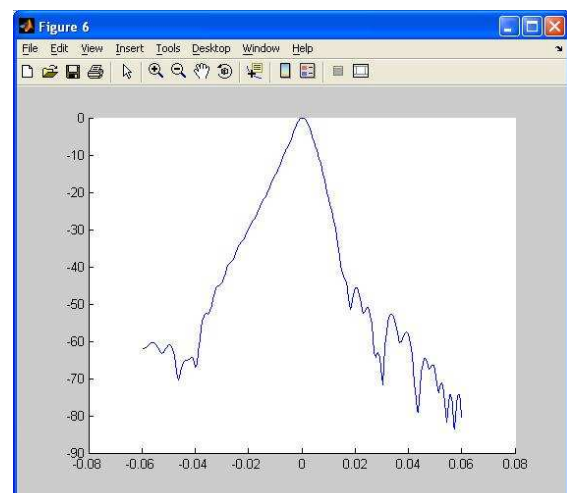


Figura 8.39: Salida 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=90$ GHz Antena Real

f=150 GHz:

Corte 1:

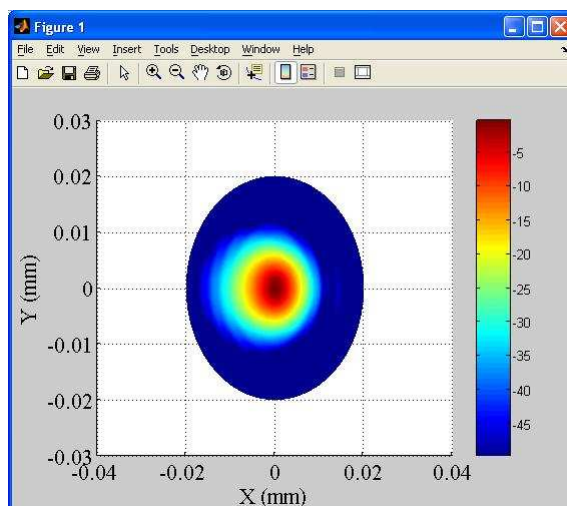


Figura 8.40: Salida 2 espejos elípticos corte 1 f=150 GHz Antena Real

Corte 2:

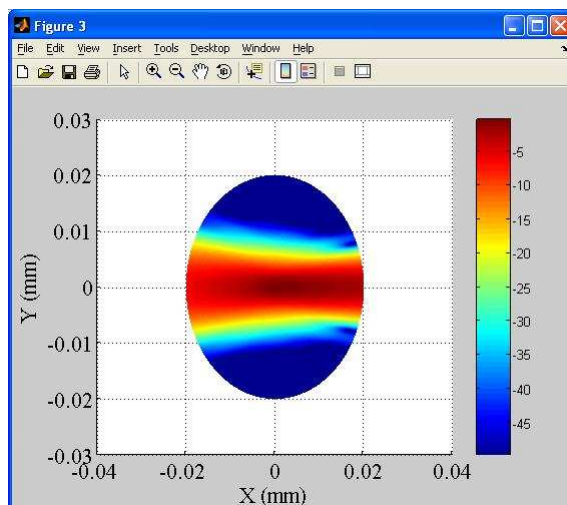


Figura 8.41: Salida 2 espejos elípticos corte 2 f=150 GHz Antena Real

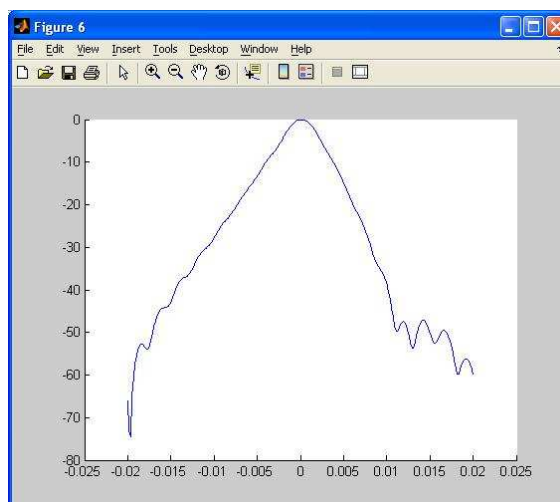



Figura 8.42: Salida 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=150$ GHz Antena Real

 $f=220$ GHz:

Corte 1:

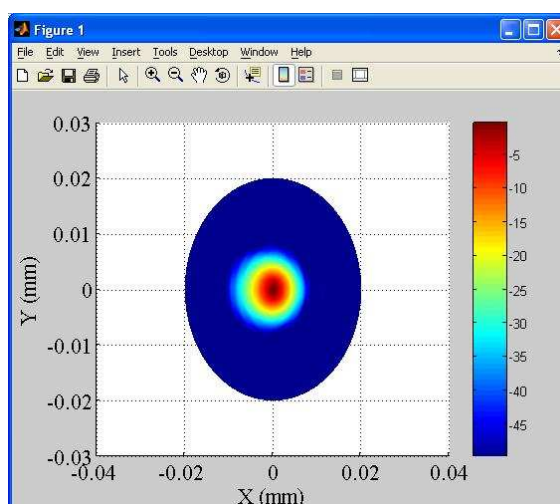


Figura 8.43: Salida 2 espejos elípticos corte 1 $f=220$ GHz Antena Real

Corte 2:

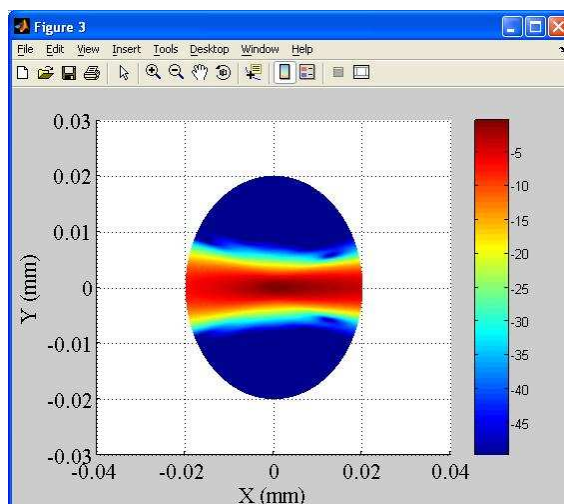


Figura 8.44: Salida 2 espejos elípticos corte 2 $f=220$ GHz Antena Real

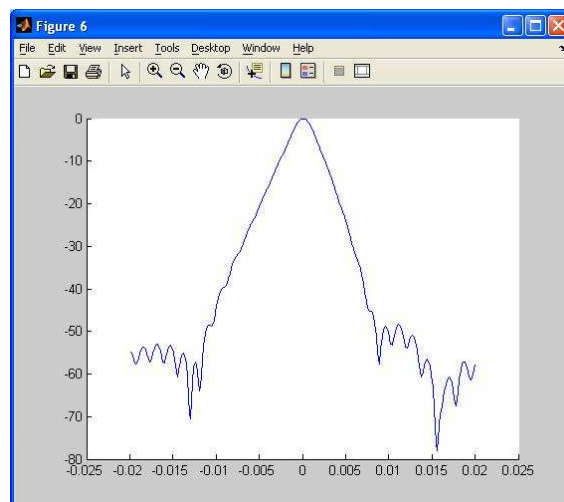



Figura 8.45: Salida 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=220$ GHz Antena Real

 $f=500$ GHz:

Corte 1:

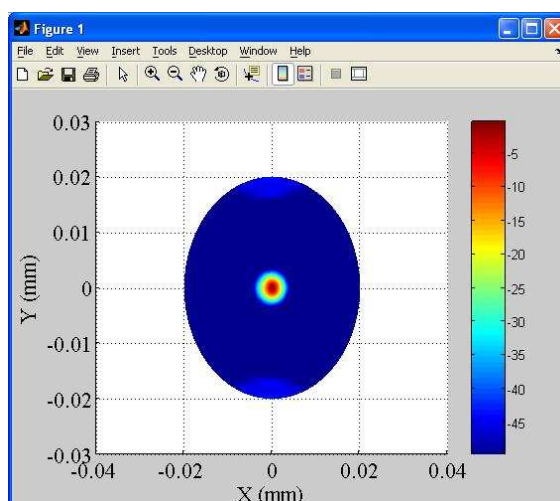


Figura 8.46: Salida 2 espejos elípticos corte 1 $f=500$ GHz Antena Real

Corte 2:

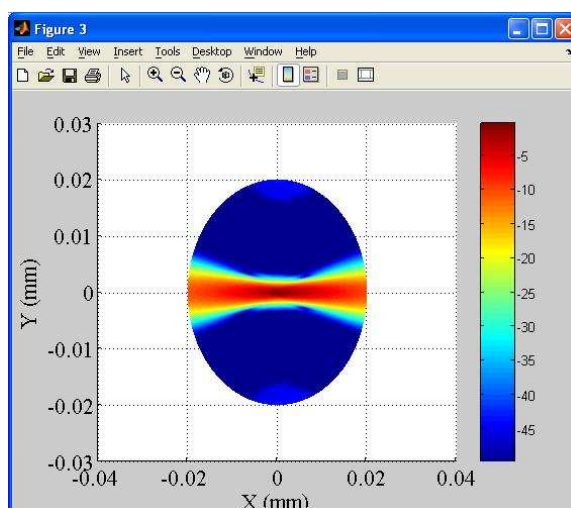


Figura 8.47: Salida 2 espejos elípticos corte 2 $f=500$ GHz Antena Real

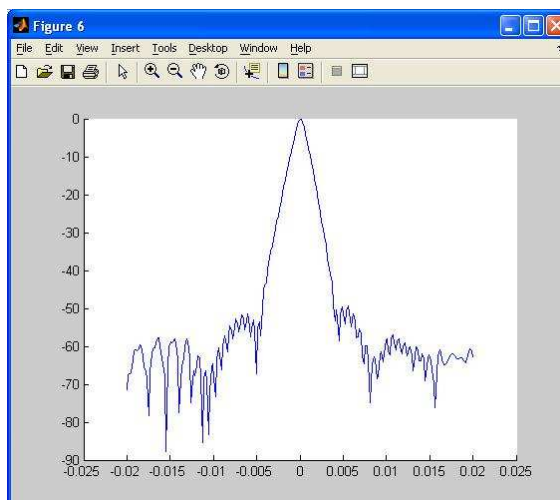


Figura 8.48: Salida 2 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 \text{ out}}$ $f=500$ GHz Antena Real

Como ya era de esperar los resultados obtenidos siguen la misma dinámica que hasta ahora siendo similares a los obtenidos en el punto de medida para esta antena y a los que se obtuvieron para la antena Gaussiana en la salida del sistema.


Los valores de $\omega_{0\ out}$ calculados a la salida para este diseño son:

$d_{in}(m)$	$f(GHz)$	ω_{0in}	Salida	
			$\omega_{0\ out\ calculada}$	$\omega_{0\ out\ simulado}$
0.15	90	6.3	5.7	5.70
0.15	150	3.8	3.6	3.42
0.15	220	2.6	2.5	2.34
0.15	500	1.1	1.1	1.03

TABLA 8.7: Tabla resumen valores $\omega_{0\ out}$ diseño 2 espejos elípticos Antena Real

Los valores obtenidos a la salida para $\omega_{0\ out}$ son prácticamente los esperados reduciéndose su valor conforme se aumenta la frecuencia y muy similares a los teóricos.

8.2.2-DISEÑO CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS

 $f=90\ GHz$:

Corte 1:

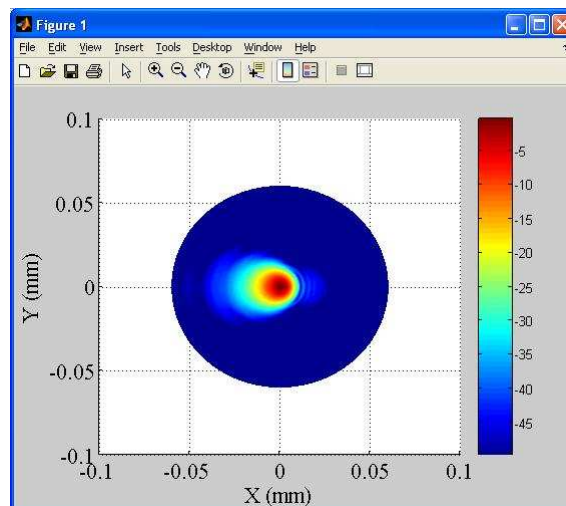


Imagen 8.49: Salida 4 espejos elípticos corte 1 $f=90\ GHz$ Antena Real

Corte 2:

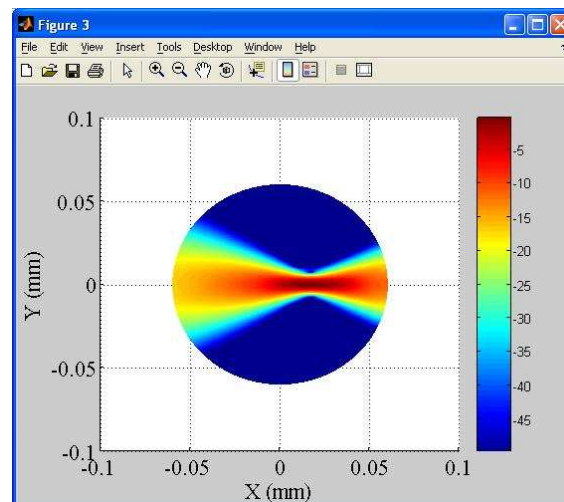


Figura 8.50: Salida 4 espejos elípticos corte2 $f=90$ GHz Antena Real

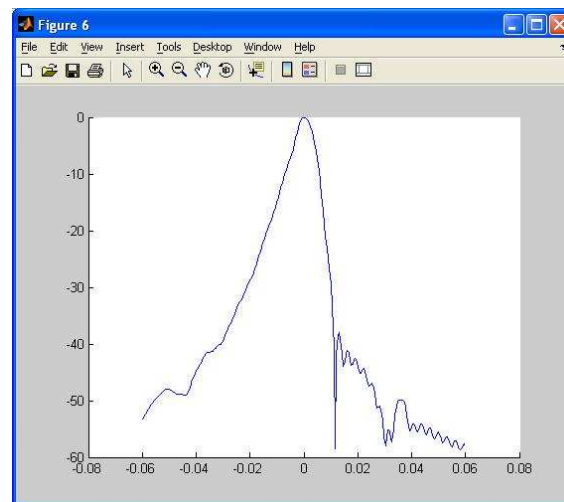



Figura 8.51: Salida 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=90$ GHz Antena Real

 $f=150$ GHz:

Corte 1:

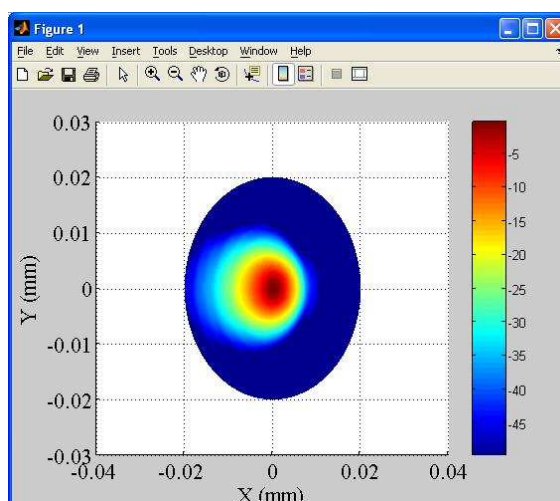


Figura 8.52: Salida 4 espejos elípticos corte 1 $f=150$ GHz Antena Real

Corte 2:

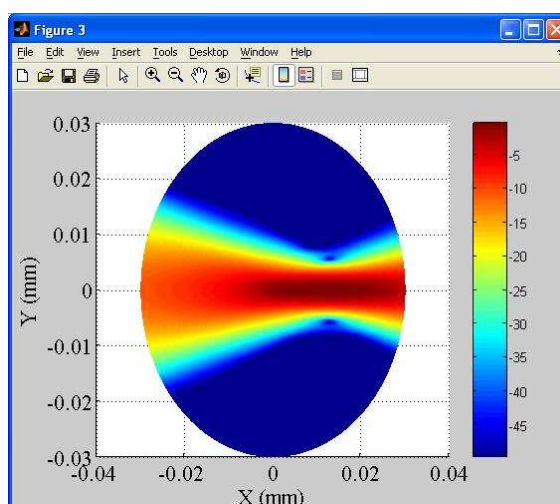


Figura 8.53: Salida 4 espejos elípticos corte2 $f=150$ GHz Antena Real

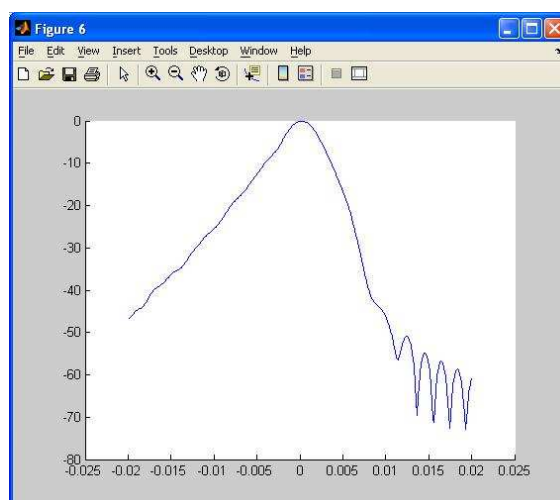


Figura 8.54: Salida 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=150$ GHz Antena Real

f=220 GHz:

Corte 1:

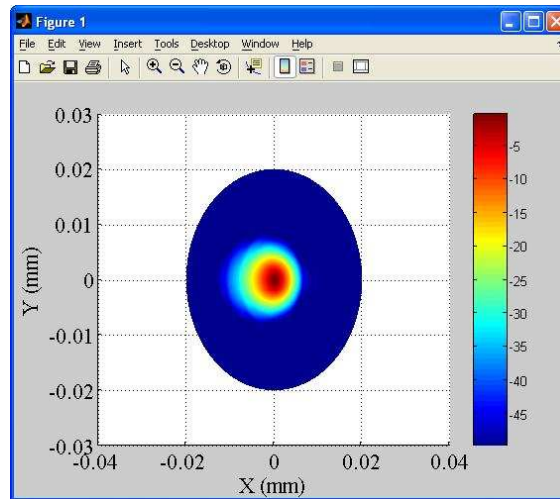


Figura 8.55: Salida 4 espejos elípticos corte 1 f=220 GHz Antena Real

Corte 2:

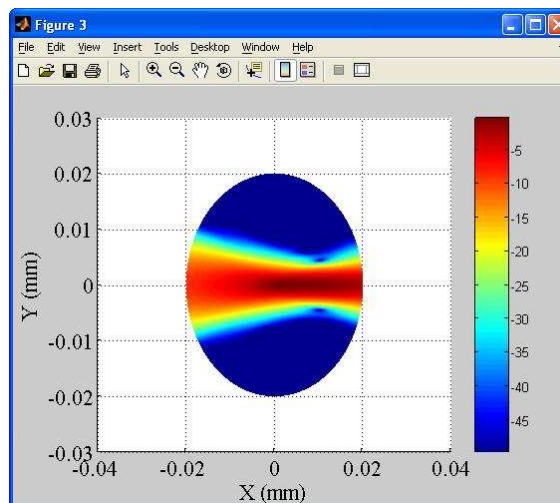


Figura 8.56: Salida 4 espejos elípticos corte2 f=220 GHz Antena Real

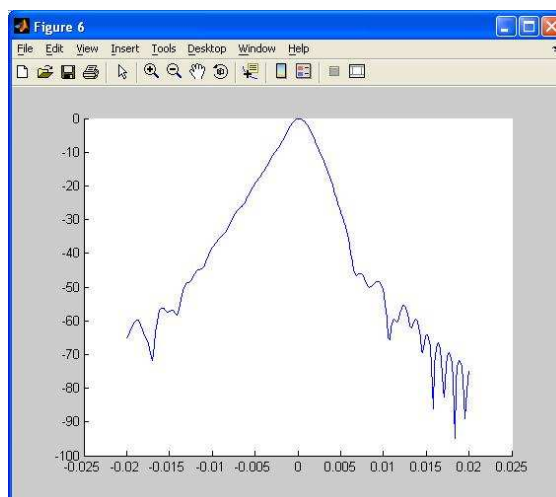


Figura 8.57: Salida 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0\ out}$ f=220 GHz Antena Real

f=500 GHz:

Corte 1:

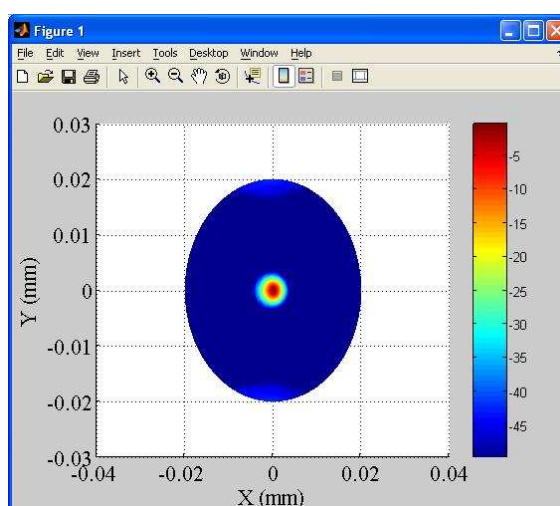


Figura 8.58: Salida 4 espejos elípticos corte 1 f=500 GHz Antena Real

Corte 2:

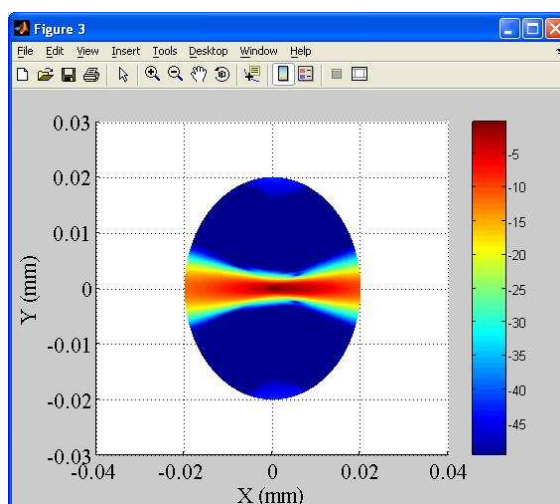


Figura 8.59: Salida 4 espejos elípticos corte2 $f=500$ GHz Antena Real

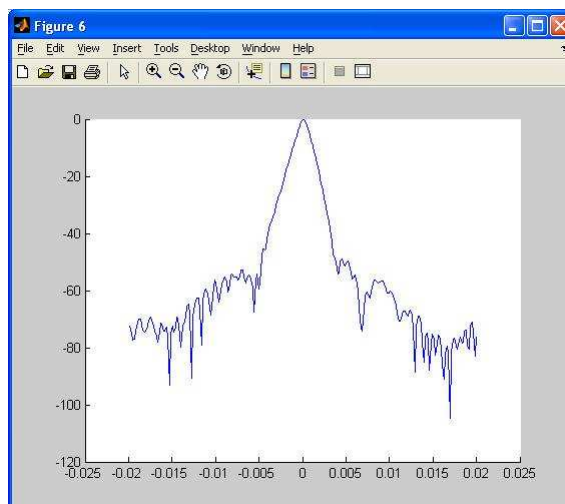


Figura 8.60: Salida 4 espejos elípticos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=500$ GHz Antena Real

Al igual que para el caso anterior, se obtienen las mismas conclusiones, teniendo cortes a la salida mejor definidos y como se muestra en la tabla 8.8 valores para $\omega_{0 out}$ muy cercanos a los ideales.

Por tanto, los valores calculados de $\omega_{0 out}$ son:

			Salida	
$d_{in}(m)$	$f(GHz)$	ω_{0in}	$\omega_{0 out} calculada$	$\omega_{0 out} simulado$
0.15	90	6.3	5.3	5.80
0.15	150	3.8	3.5	3.50
0.15	220	2.6	2.5	2.37
0.15	500	1.1	1.1	1.04

TABLA 8.8: Tabla resumen valores $\omega_{0 out}$ diseño 4 espejos elípticos Antena Real

8.2.3-DISEÑO CUATRO ESPEJOS: DOS ELÍPTICOS Y DOS PARABÓLICOS

f=90 GHz:

Corte 1:

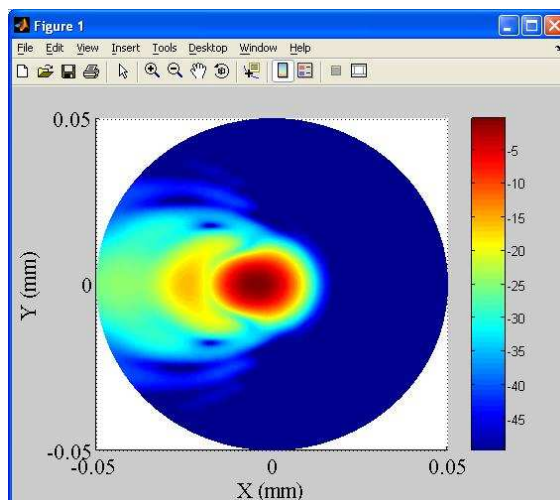


Figura 8.61: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 f=90 GHz Antena Real

Corte 2:

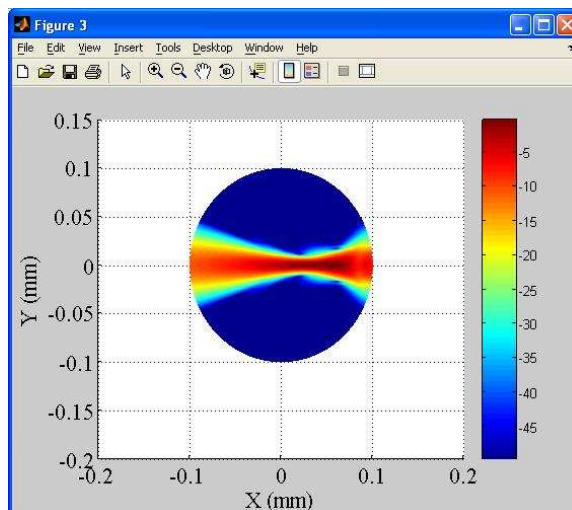


Figura 8.62: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 f=90 GHz Antena Real

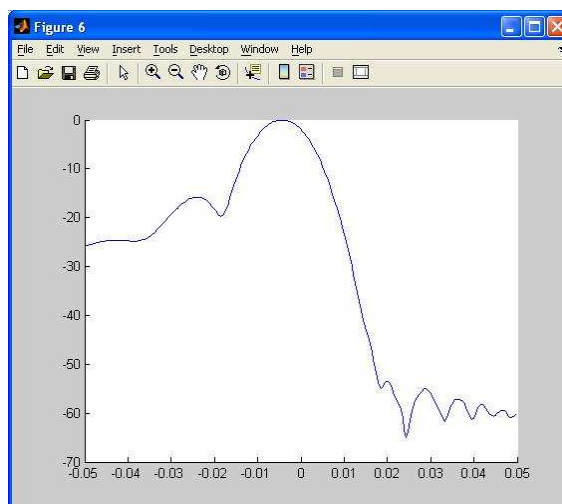



Figura 8.63: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=90$ GHz Antena Real

 $f=150$ GHz:

Corte 1:

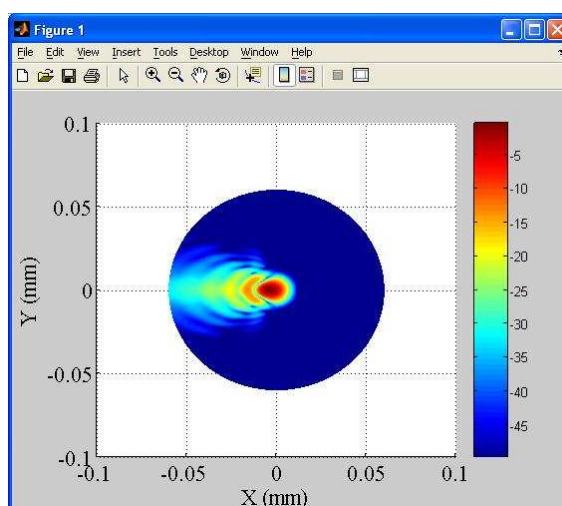


Figura 8.64: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 $f=150$ GHz Antena Real

Corte 2:

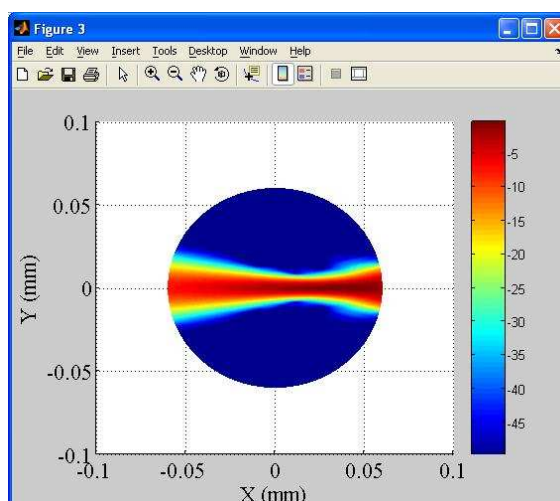


Figura 8.65: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 $f=150$ GHz Antena Real

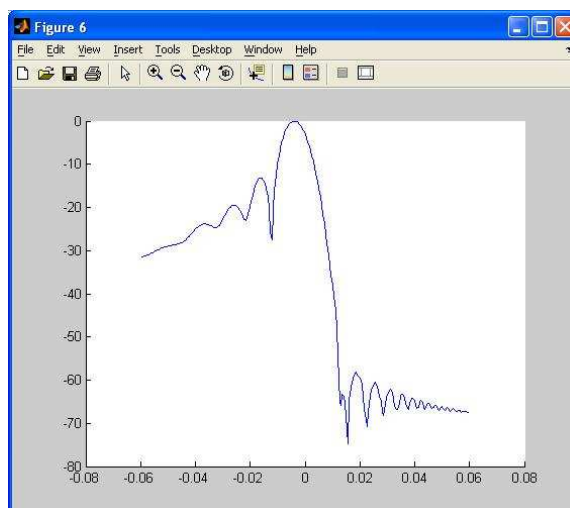



Figura 8.66: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=150$ GHz Antena Real

 $f=220$ GHz:

Corte 1:

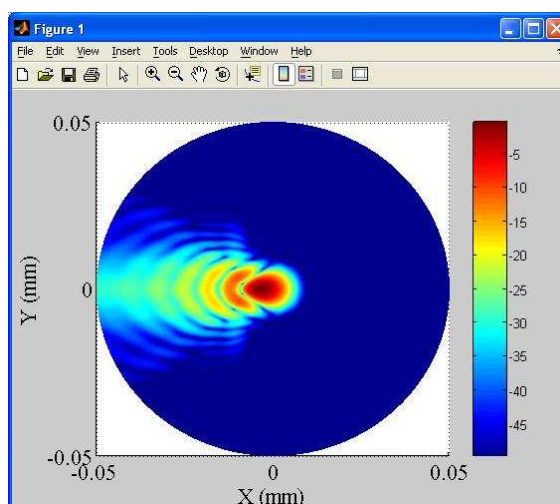


Figura 8.67: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 $f=220$ GHz Antena Real

Corte 2:

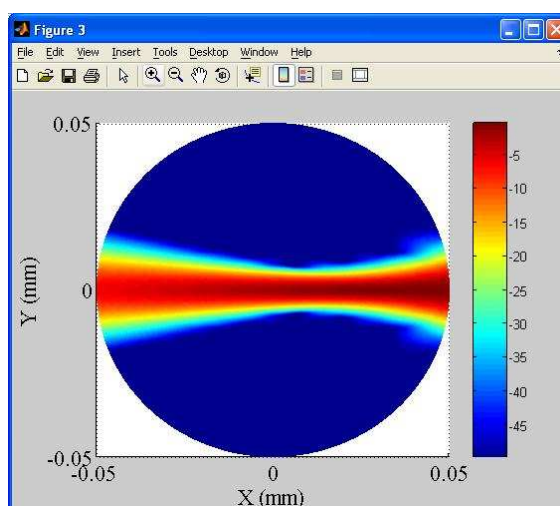


Figura 8.68: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 $f=220$ GHz Antena Real

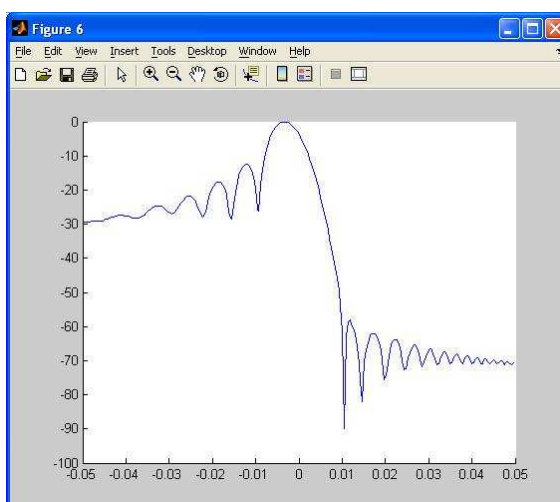


Figura 8.69: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0 out}$ $f=220$ GHz Antena Real

f=500 GHz:

Corte 1:

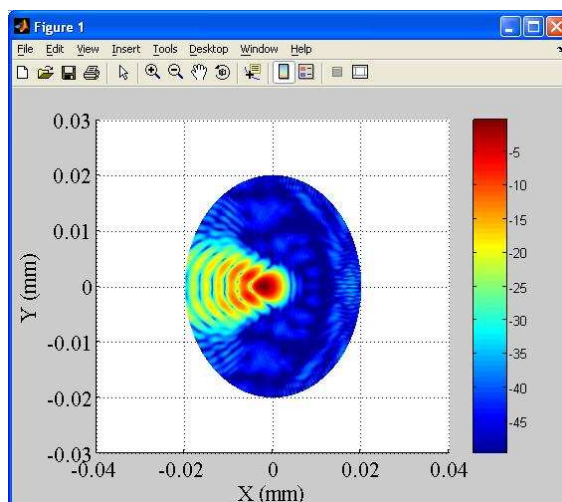


Figura 8.70: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 1 f=500 GHz Antena Real

Corte 2:

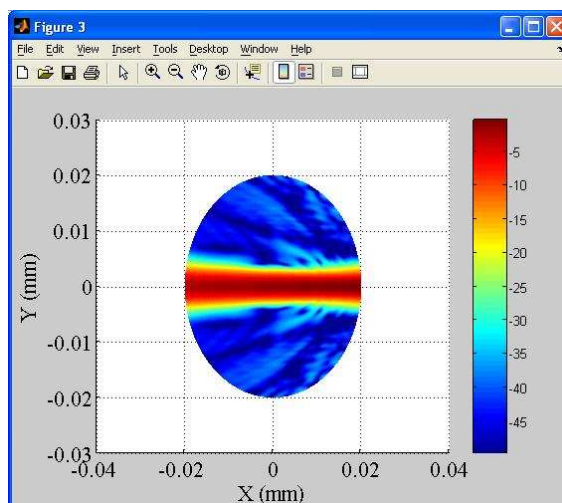


Figura 8.71: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos corte 2 f=500 GHz Antena Real

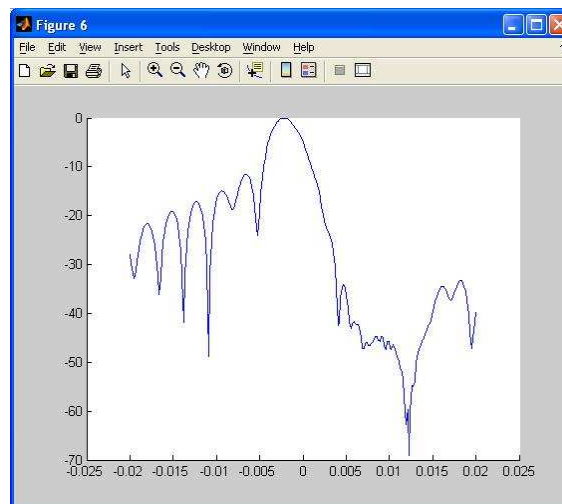


Figura 8.72: Salida 2 espejos elípticos y 2 parabólicos cálculo $\omega_{0\ out}$ $f=500$ GHz Antena Real

Por último se tiene que los valores de $\omega_{0\ out}$ para este caso son los siguientes:

			Salida
$d_{in}(m)$	$f(GHz)$	ω_{0in}	$\omega_{0\ out\ simulado}$
0.15	90	6.3	10.20
0.15	150	3.8	7.60
0.15	220	2.6	6.43
0.15	500	1.1	4.13

TABLA 8.9: Tabla resumen valores $\omega_{0\ out}$ diseño 2 espejos elípticos y 2 parabólicos Antena Real

Se observa que los valores a la salida de $\omega_{0\ out}$ son menores que los obtenidos en el punto de medida al igual que ha ocurrido siempre ya que a la salida el rayo viene reflejado de un espejo elíptico por lo que existe focalización, que implica que los valores de $\omega_{0\ out}$ se reduzcan.

8.3-CONCLUSIONES FINALES

Una vez analizados los resultados para cada uno de los tres diseños de los que consta este proyecto, para cada una de las frecuencias elegidas para trabajar y todos ellos con una antena ideal definida por el software GRASP y otra real definida a partir de las características de una antena del laboratorio, se puede concluir lo siguiente:

- Cada uno de los diseños realizados cumple las características requeridas, dando resultados muy acertados y aproximados a los ideales.
- Los valores obtenidos para $\omega_{0\ out}$ en cada uno de los casos son muy similares a los calculados teóricamente, por lo que se puede decir que el diseño cumple las expectativas.
- Los diseños realizados son capaces de trabajar a altas frecuencias manteniendo sus características y cumpliendo con los requisitos.



- Tanto el diseño con la antena ideal definida por GRASP como el diseño con la antena real definida según las características de una del laboratorio son buenos, ya que poseen un spill-over bajo.
- La potencia que llega hasta el último espejo es alta en todos los casos lo que provocará que la potencia que llegue a la antena receptora sea alta y por tanto exista un buen funcionamiento del diseño y los datos obtenidos sean precisos.
- La medida elegida para todos los espejos es la misma lo que provocará que a la hora de fabricarse algunos de los espejos sean fijos para ambos diseños y con ello se reducirá el coste.
- El rayo que atraviesa ambos sistemas mantiene su forma y cualidades a través de todo el recorrido como se ha podido ver en las imágenes obtenidas por lo que los resultados que proporcionará tendrán una gran exactitud.
- Como se ha visto los cálculos teóricos son buenos y los resultados satisfactorios ahora solo falta que en el proceso de construcción y fabricación no se cometan imperfecciones y que a la hora de medir no existan alteraciones graves.



9-MONTAJE DEL DISEÑO

9.1-COMPONENTES

En este apartado se va a hablar del montaje del diseño final. Se van a tener en cuenta los dos diseños principales de los que habla este proyecto. Estos diseños son el diseño formado por cuatro espejos elípticos cuya función es dar la posibilidad de medir pequeñas secciones de un material a altas frecuencias, y el diseño formado por dos espejos elípticos y otros dos parabólicos cuya función es medir secciones más grandes de dichos materiales. Ambos sistemas son complementarias pero a partir del un buen diseño del montaje se va a poder utilizar ambas tan solo cambiando algunos de los objetos de los que cuenta tal diseño.

Para realizar el montaje del diseño final se ha tenido que realizar en primer lugar un diseño de cada uno de los espejos. Para realizar este diseño se han tenido en cuenta los tamaños fijados en el apartado de diseño.

Los valores que se tenían para los espejos elípticos son los siguientes:

$$d_{in} = 0.15\text{m}$$

$$d_{out} = 0.15\text{m}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$\text{Eje_mayor} = 0.30\text{m}$$

$$\text{Eje_menor} = 0.212132\text{m}$$

$$\text{Distancia_focal} = 0.212132\text{m}$$

$$F1 = 45^\circ$$

$$F2 = 45^\circ$$

Por tanto, teniendo esto ya se puede dibujar el espejo. Lo único que falta por saber sería la altura que tendría el espejo, que en este caso se le va a dar 100 mm. Se ha tomado este valor para la altura a la que se coloca el espejo sobre el plano de referencia ya que de esta forma se evitaría que el rayo se reflejase sobre la superficie sobre la que está situado. Si esto ocurriese se tendrían más de un rayo y se producirían reflexiones indeseadas y multitrayecto.

El diseño de un espejo elíptico quedaría de la siguiente manera:

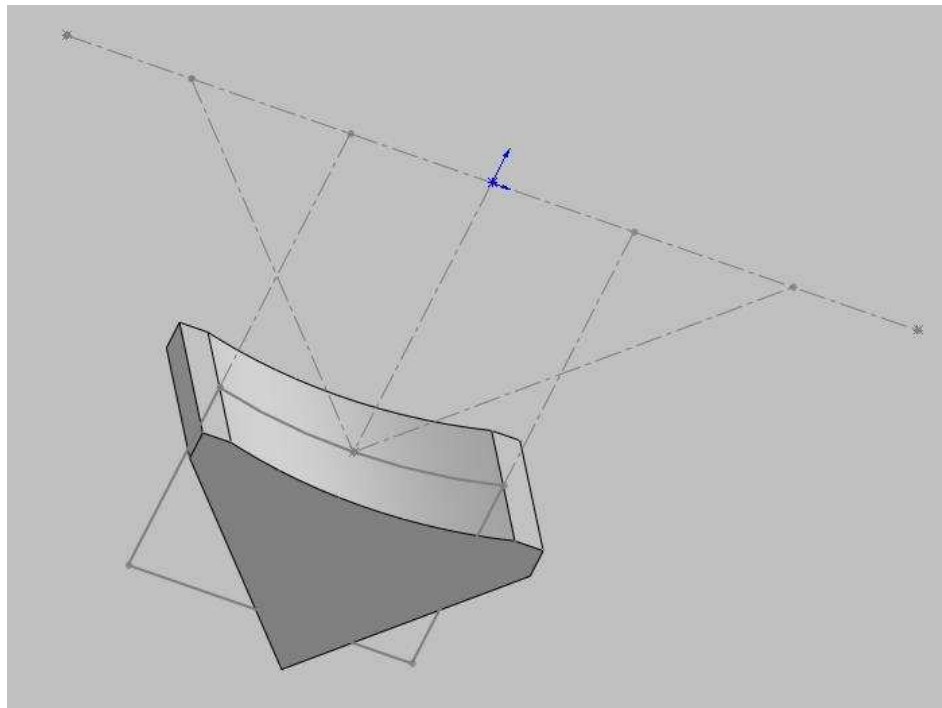


Figura 9.1: Espejo elíptico

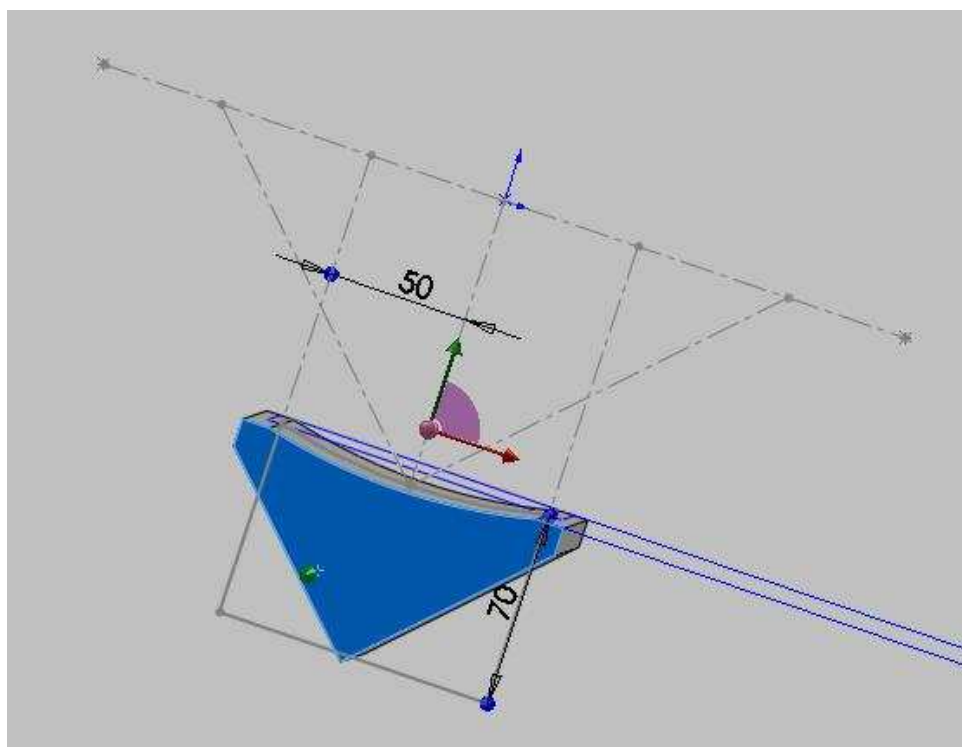


Figura 9.2: Medidas espejo elíptico

Para los espejos parabólicos los datos que se tienen son los siguientes:

$$d_{in} = 0.15\text{m}$$

$$d_{out} = 0.15\text{m}$$

$$\text{Vértice} = (0,0,0)$$

$$\text{Distancia_focal} = 0.3\text{m}$$

Con lo que el diseño de un espejo parabólico quedaría de la siguiente forma según se muestra en las figuras 9.3 y 9.4.

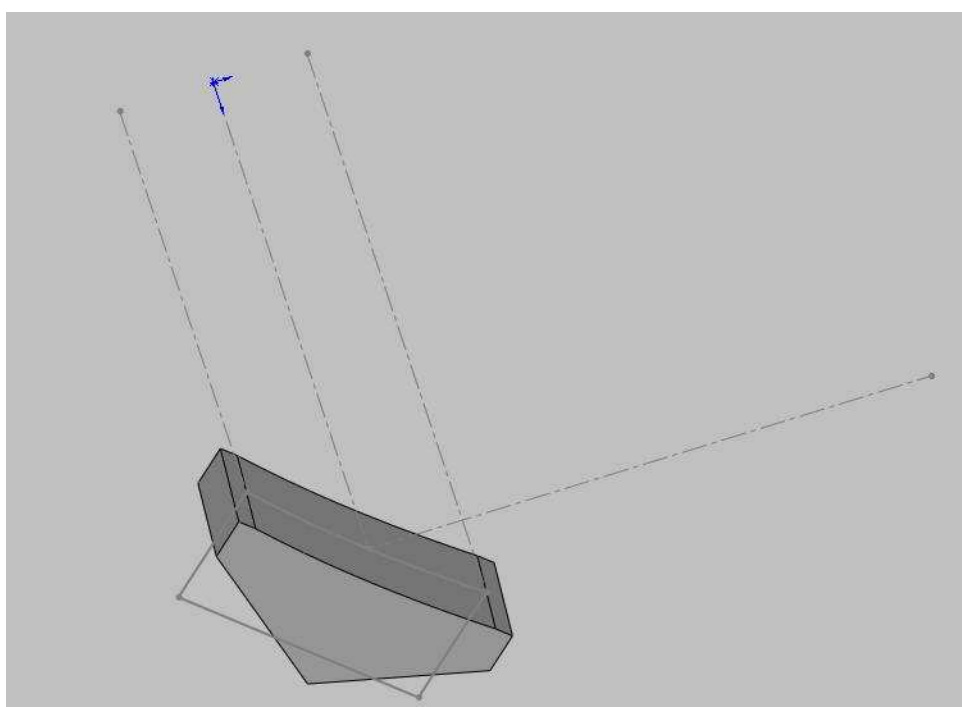


Figura 9.3: Espejo parabólico

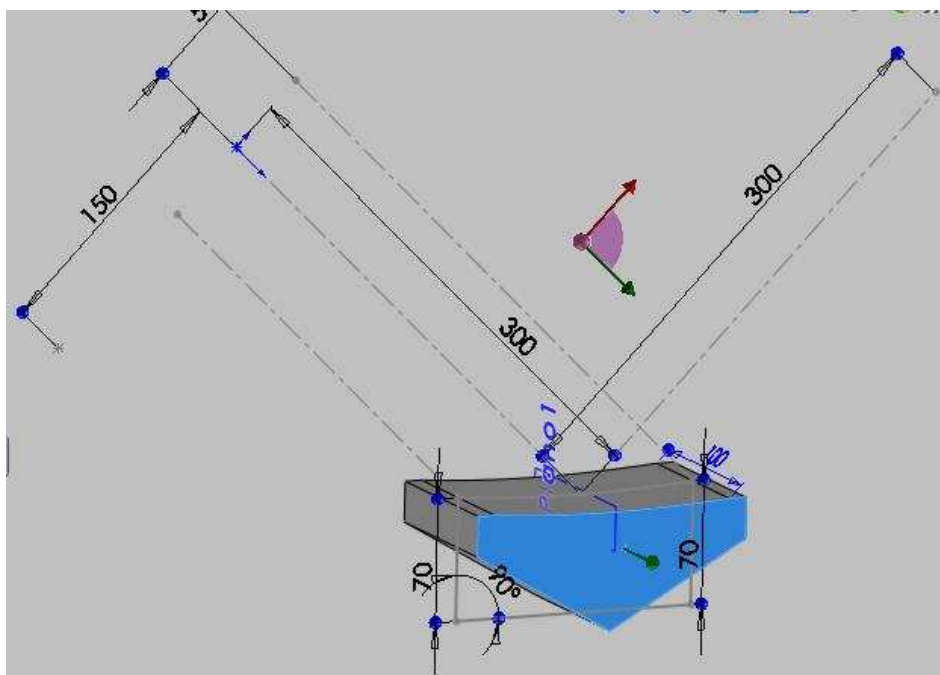


Figura 9.4: Medidas espejo parabólico

Como ya se vio en el apartado de Diseño de los espejos, se tienen dos diseños diferentes. El primero de ellos consta de cuatro espejos elípticos como el mostrado en las figuras 9.1 y 9.2, y el otro sistema consta de dos espejos elípticos y otros dos parabólicos. Si se colocaran todos los espejos a la vez para ver cómo puede ser mejor su futura situación en el sistema completo se tendría lo siguiente:

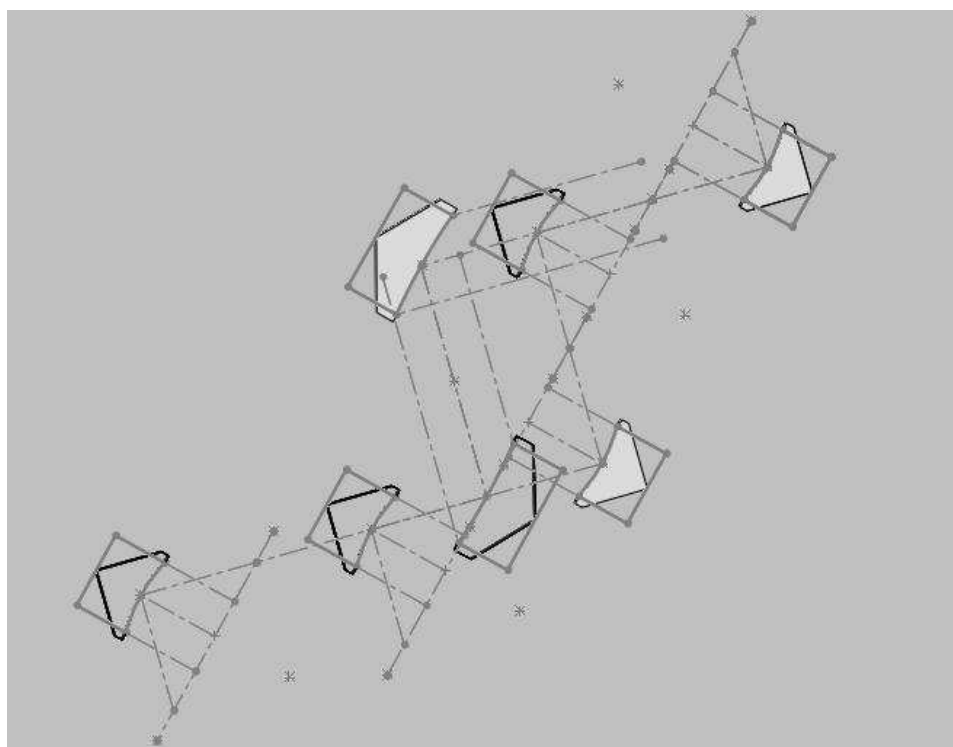


Figura 9.5: Situación final de todos los espejos utilizados

Se puede observar fácilmente que en la imagen anterior se tienen cinco espejos elípticos y dos parabólicos. El primer espejo que es un espejo elíptico es coincidente para los dos diseños por lo que solo sería necesario uno. Se puede ver también que tanto el primer espejo parabólico como el tercer espejo elíptico se pueden mantener fijos para ambos diseños ya que no molestan ahí cuando no se están utilizando. Por tanto, como se ve en la figura 8.5 se pueden mantener fijos dichos espejos que se corresponden con los que tienen un color más blanquecino en el dibujo.

Tanto el segundo espejo elíptico como el segundo parabólico es necesario quitarlos de su posición cuando no se están utilizando ya que de no ser así intervendrían en el correcto funcionamiento del otro diseño.

Con los últimos dos espejos que ambos son elípticos se podría suprimir uno de ellos e ir alternando la posición del otro según el sistema que se desee utilizar. Esto es posible ya que para ambos diseños, cuatro espejos elípticos o dos espejos elípticos y dos parabólicos, el último espejo es un espejo elíptico. Por tanto, se podría utilizar en mismo espejo en ambos casos simplemente teniendo en cuenta que la posición en la que se debe colocar varía según se trate de un diseño u otro. De esta forma se evita la construcción de un espejo y se reduce el coste, al igual que ocurre con el primer espejo del diseño.

Una vez analizados los espejos que se han de colocar y hecho el diseño, es necesario diseñar los soportes tanto para la antena emisora y receptora como para la muestra que se desea medir.

Para ello hay que tener en cuenta que la antena emisora estará situada para ambos casos en la misma posición por tanto sólo será necesario un soporte utilizable en ambos diseños. También se debe tener en cuenta que el tamaño de la antena variará dependiendo de la frecuencia a la que se esté trabajando, por lo que se harán distintos soportes dependiendo del diámetro necesario. En primer lugar se va a diseñar un único soporte que tendrá la siguiente forma:

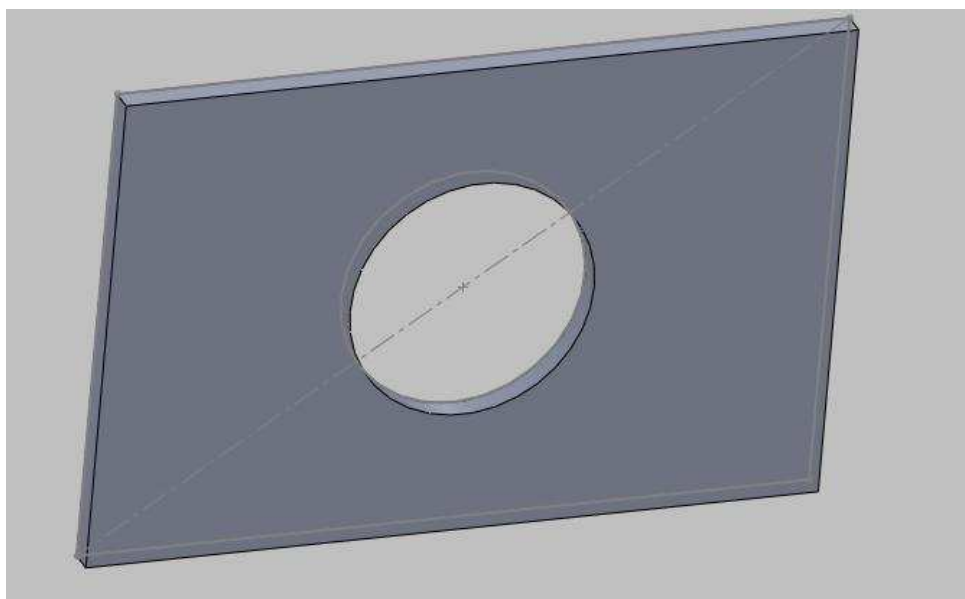


Figura 9.6: Soporte antena emisora

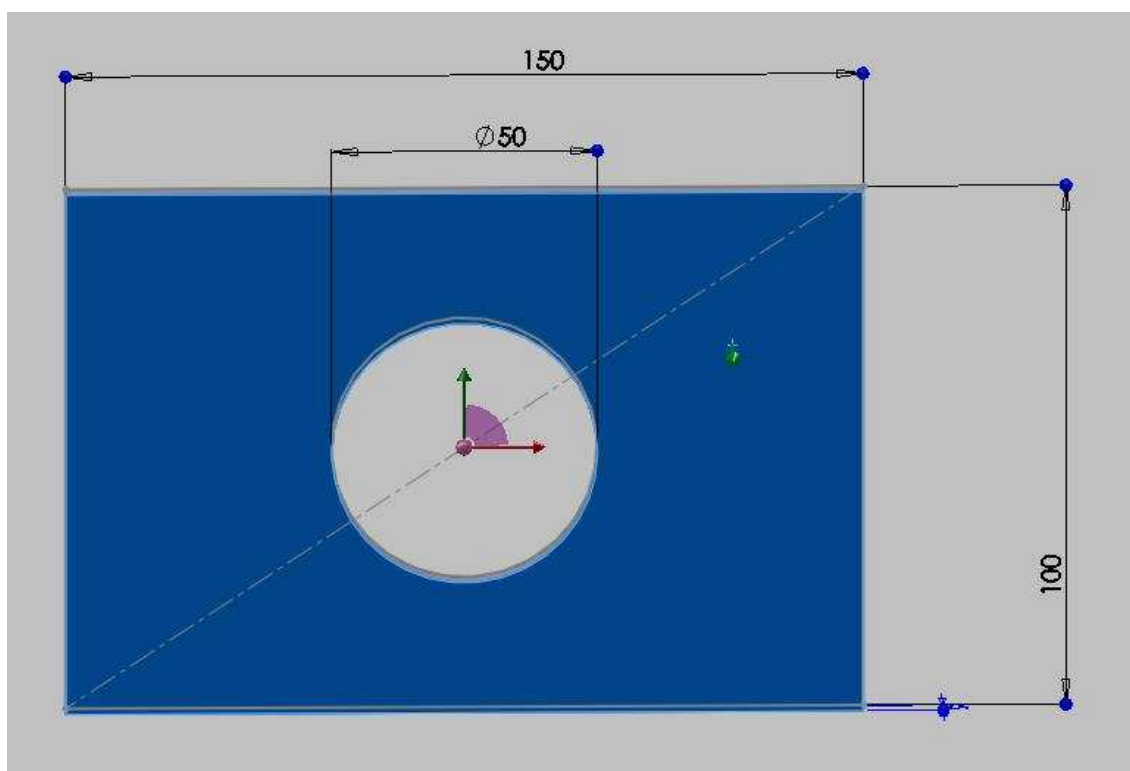


Figura 9.7: Medidas soporte antena emisora



Se ha tomado un diámetro para colocar la antena orientativo de 50 mm, pero como ya se ha dicho antes variará dependiendo de la antena utilizada. La anchura que se le ha dado a la placa es de 100 mm al igual que a los espejos. Y el grosor de la placa es de 5 mm.

El soporte que se utilizará para la antena receptora tendrá las mismas características pero en este caso serán necesarios dos soportes diferentes ya que la posición en la que se ha de colocar varía dependiendo de si se trata del diseño de cuatro espejos elípticos o del de dos espejos elípticos y dos parabólicos.

Esto es debido a que en el diseño con cuatro espejos elípticos se tiene que la distancia d_{in} es de 0.15 m y d_{out} también. Por tanto la distancia desde la antena emisora al primer espejo es 0.15 m y al igual que la distancia entre espejos. Por tanto, el diseño total desde la antena emisora a la antena receptora es de 1.2 m. Esto es así ya que se juega a situar los elementos en los focos de la elipse imaginaria que se forma con cada espejo. Por ejemplo, el primer espejo es parte de una elipse en cuyos focos se ha situado la antena emisora y el punto central entre el primer y segundo espejo, que equivale también a uno de los focos de la elipse de la que forma parte el segundo espejo. Y así sucesivamente.

Sin embargo para el diseño de dos espejos elípticos y dos parabólicos ya no se juega con esta característica y por tanto las medidas son diferentes. A pesar de que la distancia focal para los espejos parabólicos también es 0.15 m, las medidas a las que se encuentran estos espejos varían ya que las características de un espejos elíptico y uno parabólico no son las mismas. La distancia total que recorre el rayo en este caso es de 1.5 m.

Esta distancia ha aumentado ya que ahora la distancia existente entre el primer y segundo espejo, y el tercer y cuarto espejo ya no es 0.30 sino 0.45 m. Esto es así ya que ahora desde el segundo foco de la primera elipse al segundo espejo ya no hay 0.15 metros que es la distancia focal, sino que varía porque para los espejos parabólicos esta distancia es ahora dos veces la distancia focal, es decir, 0.30 m. Lo mismo ocurre para el otro conjunto de espejo parabólico y elíptico. Sin embargo la distancia entre ambos espejos parabólicos se mantiene constante e igual a 0.30 m, por lo que la altura a la que se encontrará la muestra se mantiene y simplemente se desplazará hacia la izquierda o derecha su posición, al igual que para la antena receptora. Por este motivo se harán dos soportes diferentes para la antena según se quiera medir con un diseño u otro, y la distancia a la que se encontrarán los puntos de dichas antenas varía 0.30 m, que es la suma de los dos desplazamientos de 0.15 metros que se han realizado con respecto al diseño anterior.

Por tanto, el diseño de ambos soportes será el mismo y será de la siguiente manera:

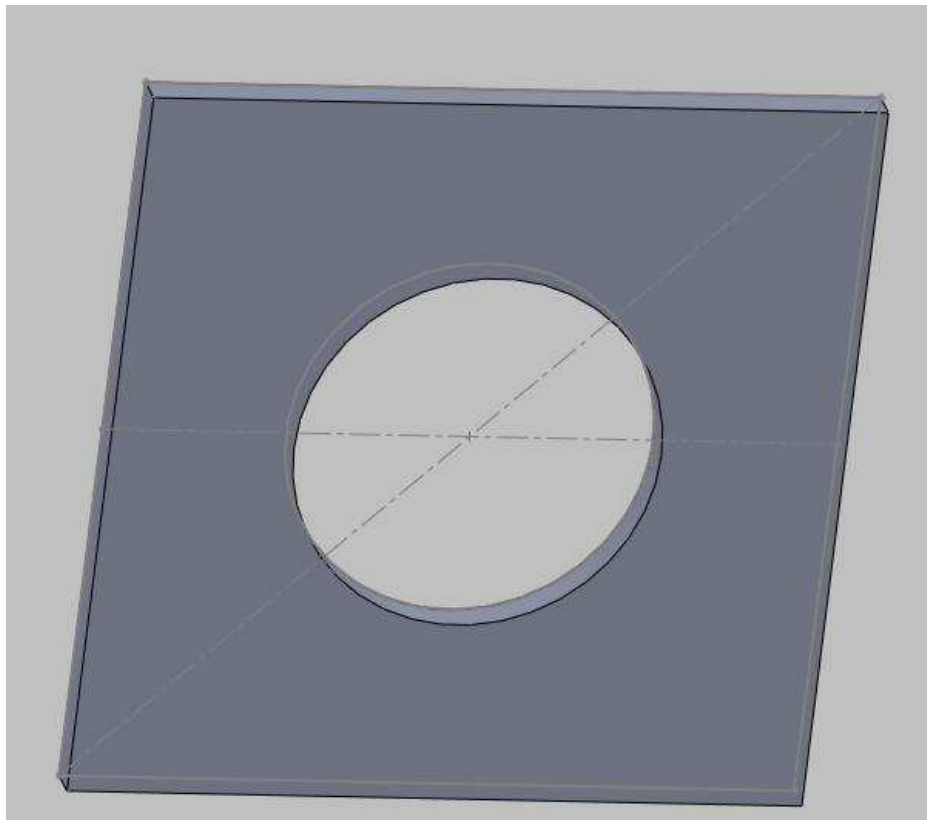


Figura 9.8: Soporte antenna receptora

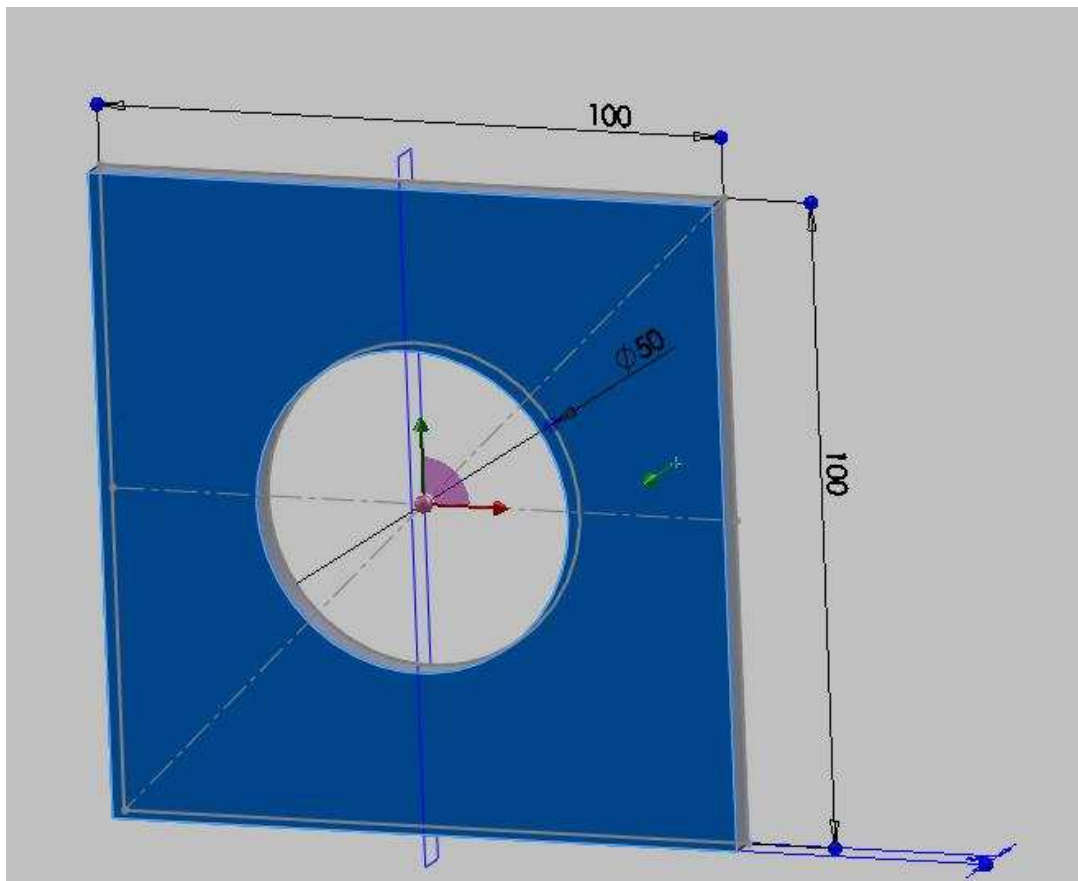


Figura 9.9: Medidas soporte antenna receptora

Este soporte simplemente se diferencia con el de la antena emisora en que la longitud es de 100 mm en vez de 150 mm ya que ahora hay que colocar dos soportes de estos por lo que se ha reducido su tamaño.

Para el soporte de medida de la muestra también se ha tenido el mismo problema, ya que el punto de medida de la muestras no está situado en el mismo lugar en ambos diseños. Ocurre como en el caso anterior que ha habido un desplazamiento de 0.15 metros del primer espejo parabólico con respecto al segundo espejo elíptico del otro diseño, por tanto el punto de medida de uno y otro diseño se sitúan a la misma altura pero con un desplazamiento horizontal entre ellos de 0.15 m.

Ambos soportes se van a diferenciar también en que el diámetro del punto de medida es diferente ya que para el diseño de cuatro espejos elípticos el valor de $\omega_{0\ out}$ es mucho menor ya que para ese diseño existe focalización en ese punto a diferencia del diseño combinado de espejos elípticos y parabólicos.

Por tanto, el diseño de los soportes será el siguiente:

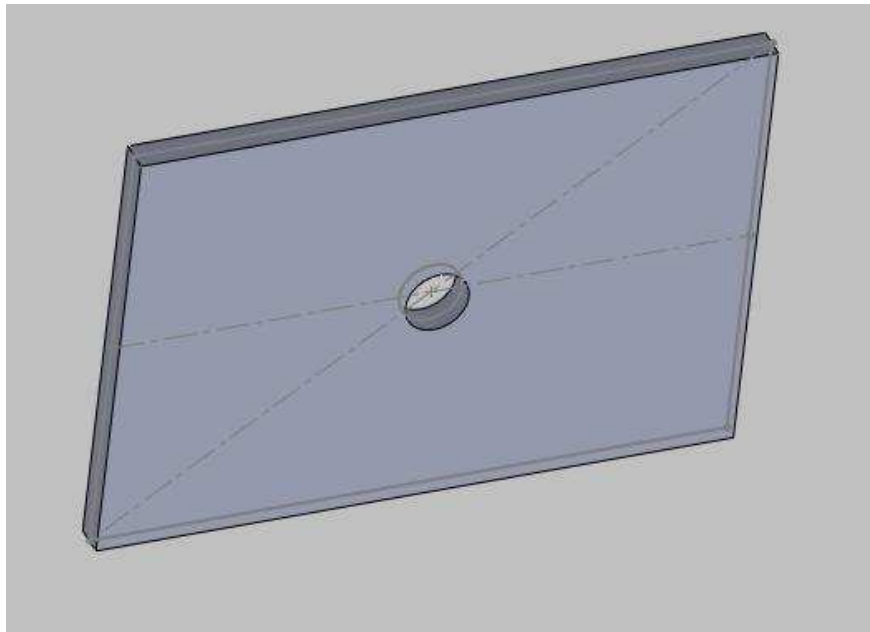


Figura 9.10: Soporte medida muestras espejos parabólicos

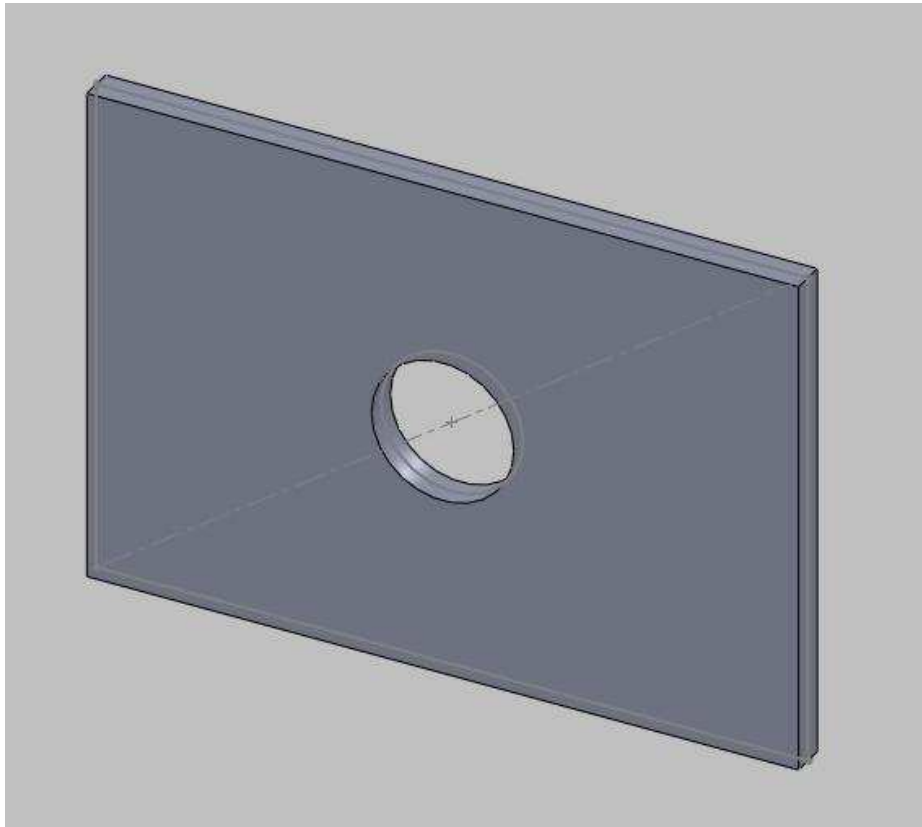


Figura 9.11: Soporte medida muestras espejos elípticos

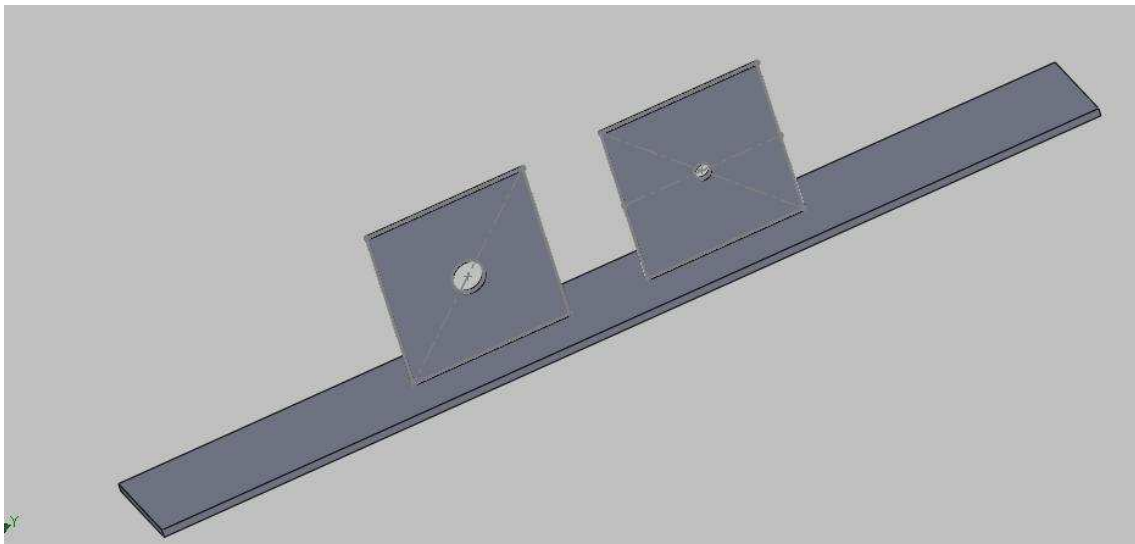


Figura 9.12: Soporte final medida muestras

La figura 9.10 se corresponde con el soporte para el diseño de cuatro espejos elípticos y la figura 9.11 es la referida al diseño que combina espejos elípticos y parabólicos. Estas dos imágenes se diferencian únicamente en el diámetro de círculo situado en el centro de la placa que será por donde pasará el haz cuando se esté midiendo.

La figura 9.12 se corresponde con el diseño de final de ambos soportes. Dichos soportes se van a situar sobre una placa como se muestra en dicha figura. Esto tiene como objetivo que se pueda retirar dicha pieza del diseño final con el fin de hacer un barrido para obtener otro tipo de resultados. El barrido se hará de una zona de unos 30 cm que se irá desplazando a través de la ranura que se ha dejado en la placa donde se apoya el sistema final. La placa en la que se sitúan ambos soportes tendrá la siguiente forma:



Figura 9.13: Placa soporte muestras

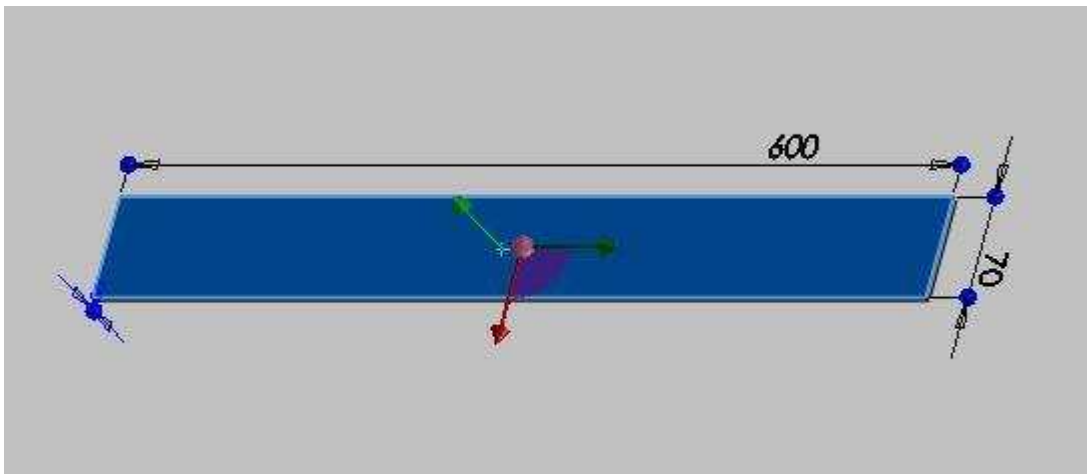


Figura 9.14: Medidas placa soporte muestras

Las medidas que se le han dado a la placa son de 600x70 mm, suficientes para que cuando se retire se pueda realizar un barrido de unos 30 cm de longitud.

Se va a proceder una vez explicado el diseño de todos los elementos necesarios para el montaje, a explicar el soporte donde se va a colocar sistema cuasi-óptico. Para dicho soporte se ha pensado hacer un diseño con tres paredes, una que sirva para apoyarlo, otra que sea en la que se sitúan todos los elementos del sistema y la otra que sea una de las paredes laterales.

El motivo por el que se va a hacer un diseño con tres paredes es que se ha pensado en la posibilidad de tener el sistema en dos posiciones diferentes. Es decir, al hacer esto se va a poder medir en horizontal y en vertical según sea más conveniente en un caso u otro. Según se apoye el sistema total sobre una pared u otra tendremos que la energía viajará en sentido vertical o en horizontal.

El diseño se va a realizar en dos partes, en primer lugar la pared en la que se va a colocar todo el sistema y la pared lateral, donde se apoyará para medir en sentido horizontal, y en segundo lugar la base donde se va a apoyar cuando esté situada para medir en sentido vertical.

Por tanto, la primera parte es la que nos va a fijar el tamaño de la segunda ya que dependerá del tamaño que se le den a esas paredes. Se debe tener en cuenta que el tamaño de la pared que soporta todo el sistema debe ser suficiente para abarcar ambos diseños. Por tanto, quedaría de la siguiente forma:

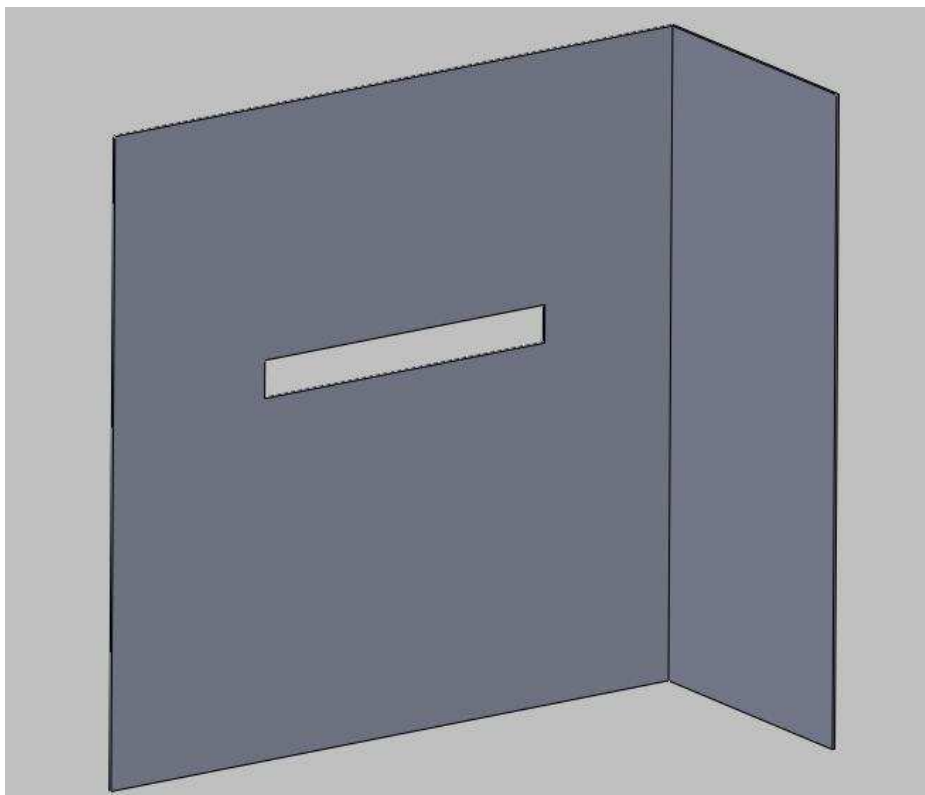


Figura 9.15: Diseño paredes frontales

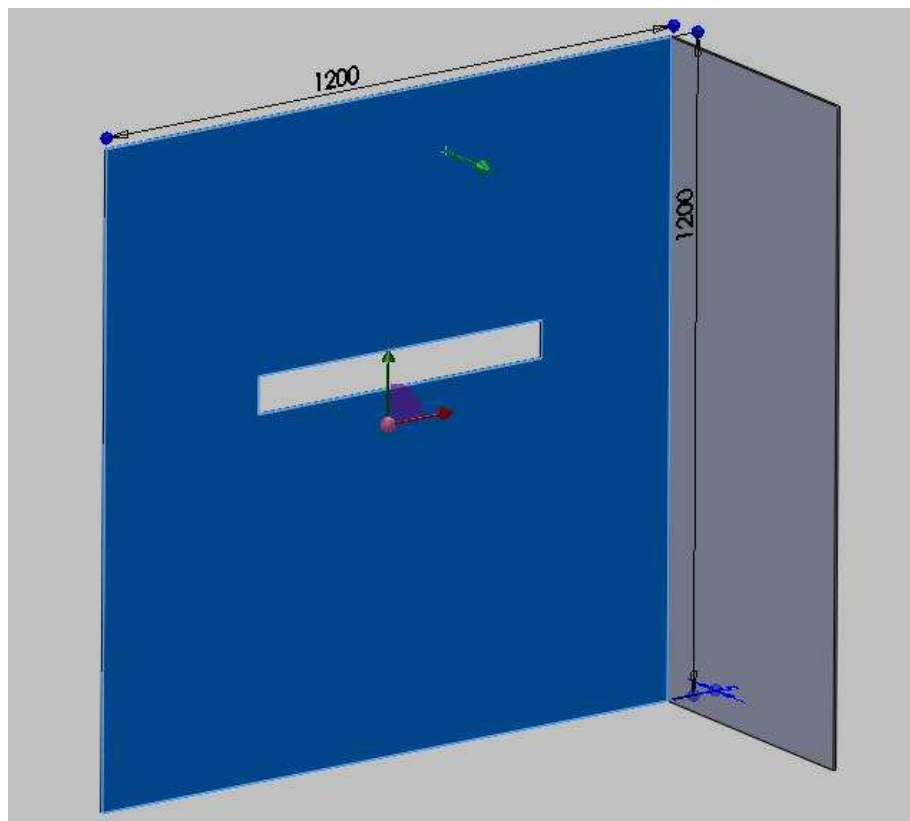


Figura 9.16: Medidas diseño paredes frontales 1

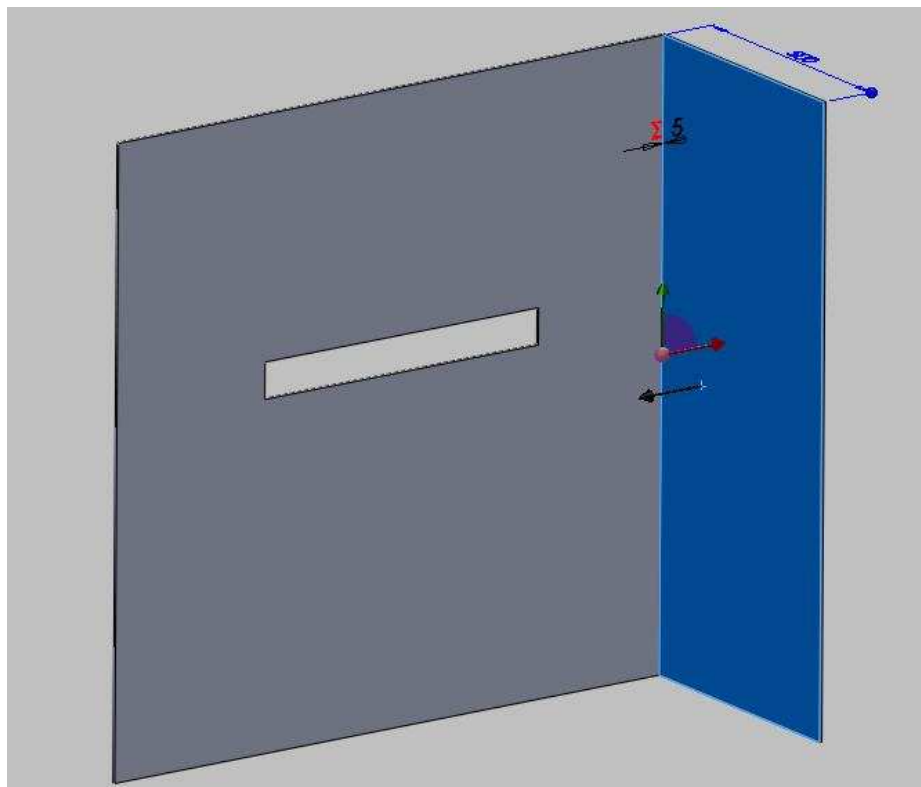


Figura 9.17: Medidas diseño paredes frontales 2

Y por tanto al darle un tamaño a la primera pared de $120 \times 120 \text{ mm}^2$ y a la segunda de $50 \times 120 \text{ mm}^2$ queda que la base de ambas debe ser de $120 \times 50 \text{ mm}^2$ más el grosor de la primera pared. El grosor de todas las paredes se ha tomado de 5 mm. Con todo esto, se tiene que la base es la siguiente:

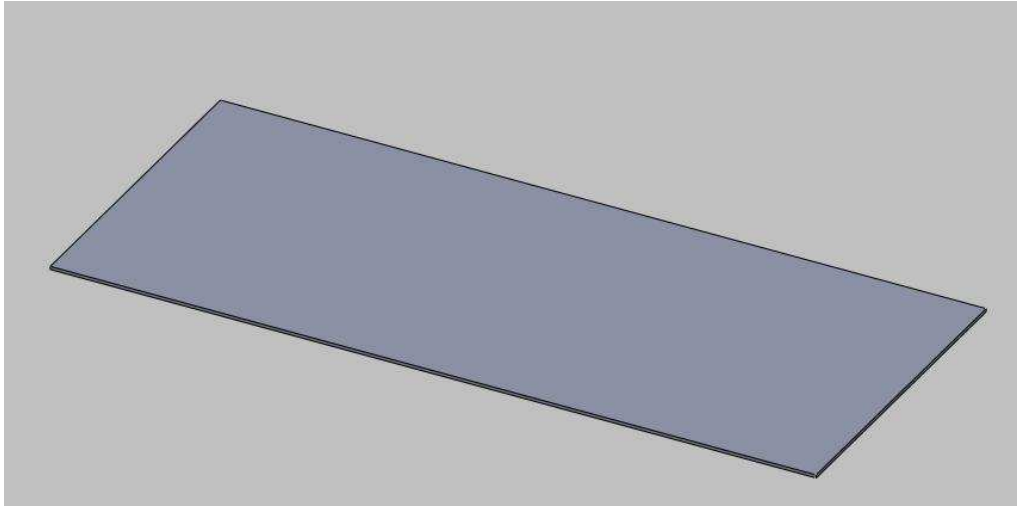


Figura 9.18: Diseño pared inferior

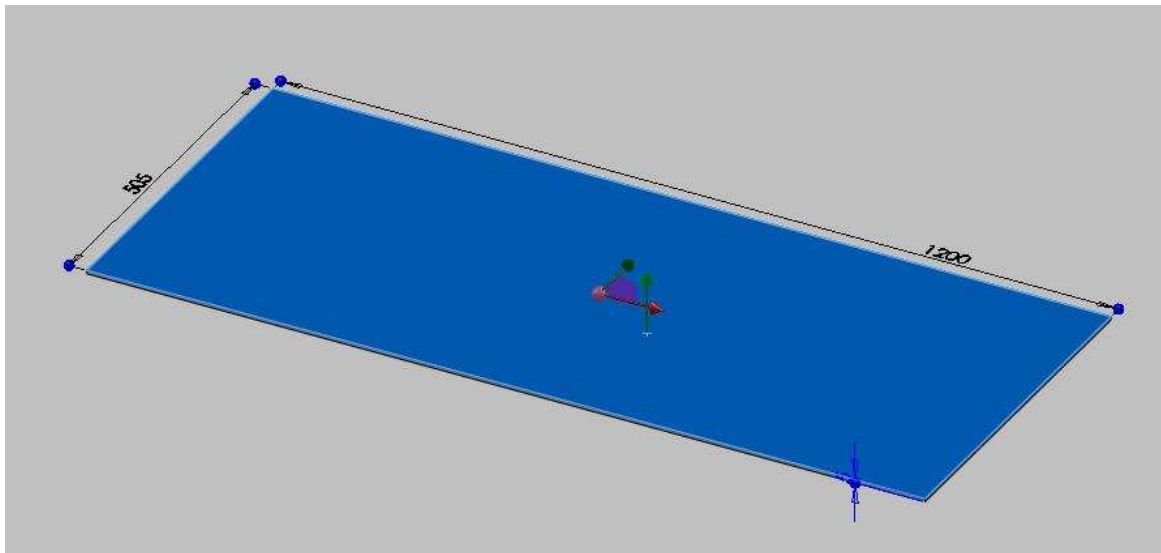


Figura 9.19: Medidas diseño pared inferior

Por tanto, vemos que el tamaño final de la base es $120 \times 505 \text{ mm}^2$.

Con todo lo que se ha explicado ya del montaje se puede mostrar a continuación los cuatro posibles montajes que se tendrán. Dichos montajes se corresponden con el montaje fijo, el montaje completo con todos los espejos y soportes, el montaje correspondiente al sistema de

cuatro espejos elípticos y por último el montaje del sistema combinado de espejos elípticos y parabólicos.

Dichos montajes quedarán de la siguiente forma:

9.2-MONTAJE FIJO

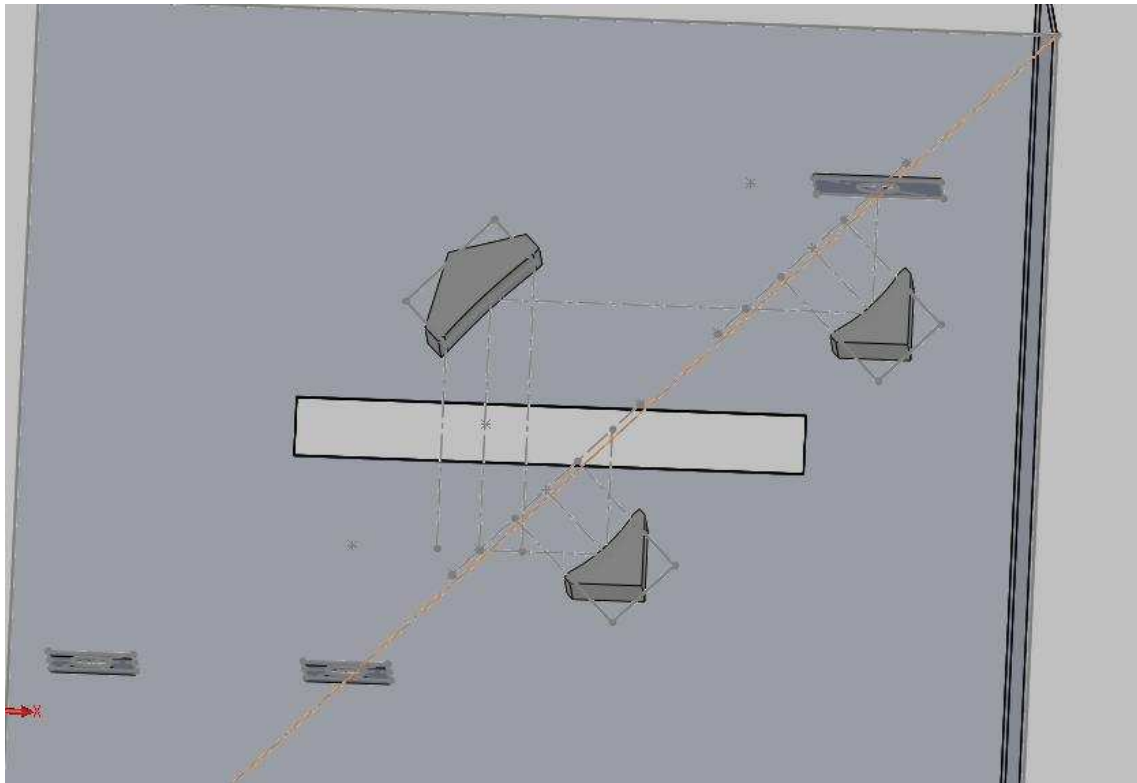


Figura 9.20: Montaje fijo

Este montaje se corresponde con el montaje de todos los elementos fijos. Es decir, estos elementos van a estar siempre colocados en el soporte ya que no es necesario que sean retirados cuando no se estén utilizando ya que no intervienen en el buen funcionamiento del sistema cuasi-óptico en cualquiera de sus configuraciones. Por tanto, es mucho más cómodo y permite mayor fiabilidad, mantenerlos en el soporte siempre. De este modo, al tener los soportes de medida y los de las antenas siempre colocados, se asegura que todo esté alineado.

9.3-MONTAJE COMPLETO

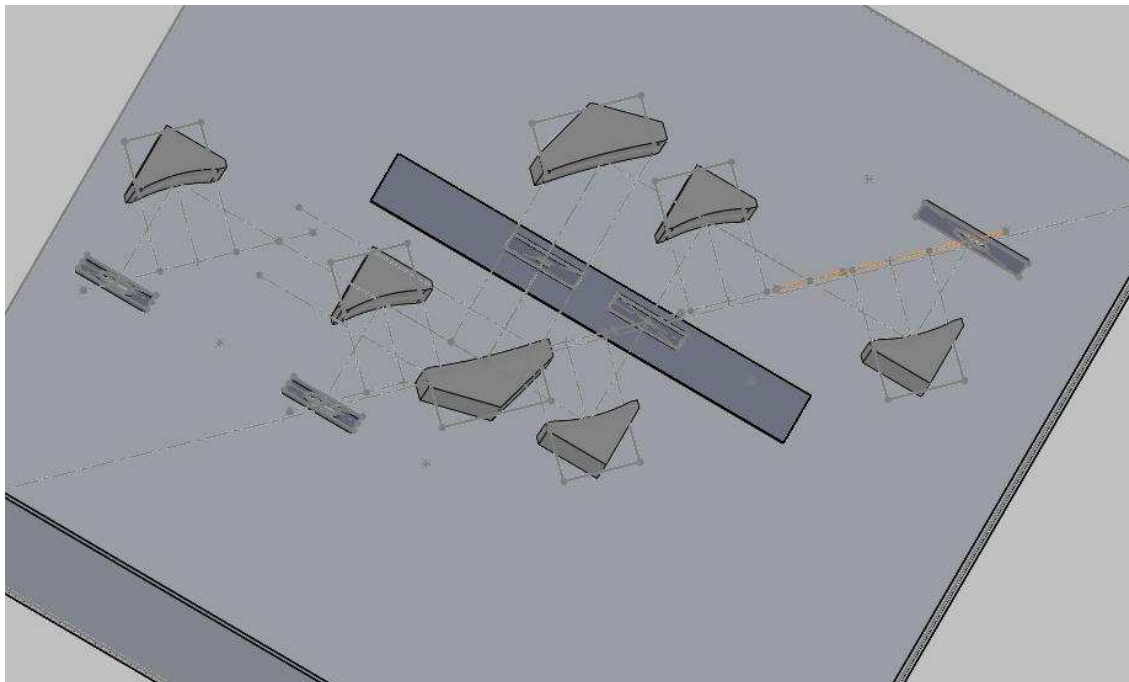


Figura 9.21: Montaje completo

En este otro montaje se muestran todos los elementos necesarios para el funcionamiento de ambos sistemas. Se observa cómo hay colocados 5 espejos elípticos y 2 parabólicos. Hay también 3 soportes para las antenas tanto emisora como receptora y 2 soportes para las muestras que se han de medir, una para cada sistema sobre la placa que se retirará para hacer el barrido de medidas. Se observa que de los 5 espejos elípticos uno de ellos puede quitarse e ir alternando la posición de otro de ellos según una configuración o la otra, de este modo se evita tener que construir un espejo y así se ahorra coste.

9.4-MONTAJE DISEÑO 1: CUATRO ESPEJOS ELÍPTICOS

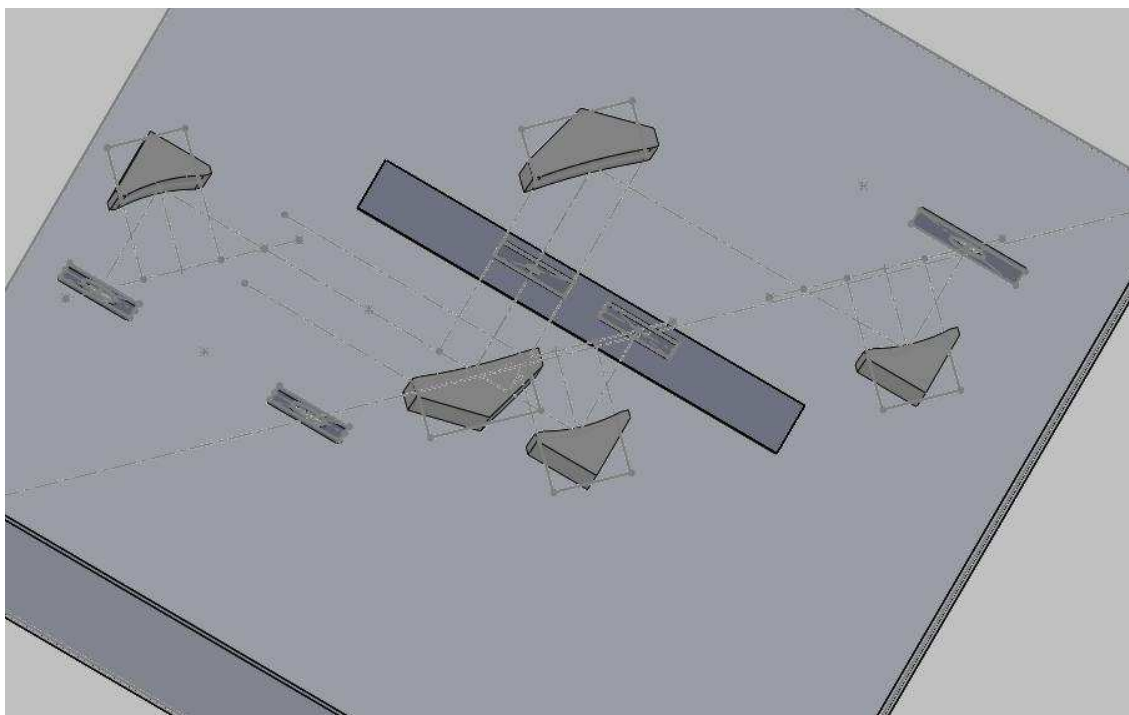


Figura 9.21: Montaje 4 espejos elípticos

Este montaje es el correspondiente al sistema de cuatro espejos elípticos. Se ven claramente en el montaje los cuatro espejos elípticos que se utilizarán para que dicho sistema funcione y a parte se observa también un espejo parabólico que es uno de los elementos fijos. Este espejo parabólico no interviene en el funcionamiento por tanto, como ya se ha dicho antes, se puede mantener colocado en el soporte a pesar de no ser utilizado.

Como ya se sabe este sistema es el destinado a medir zonas reducidas de muestras por tanto, como ya era de esperar, el soporte de medida de muestras que se utilizará es el de posee el círculo por donde irá la energía de menor diámetro.

8.5-MONTAJE DISEÑO 2: DOS ESPEJOS ELÍPTICOS Y DOS PARABÓLICOS

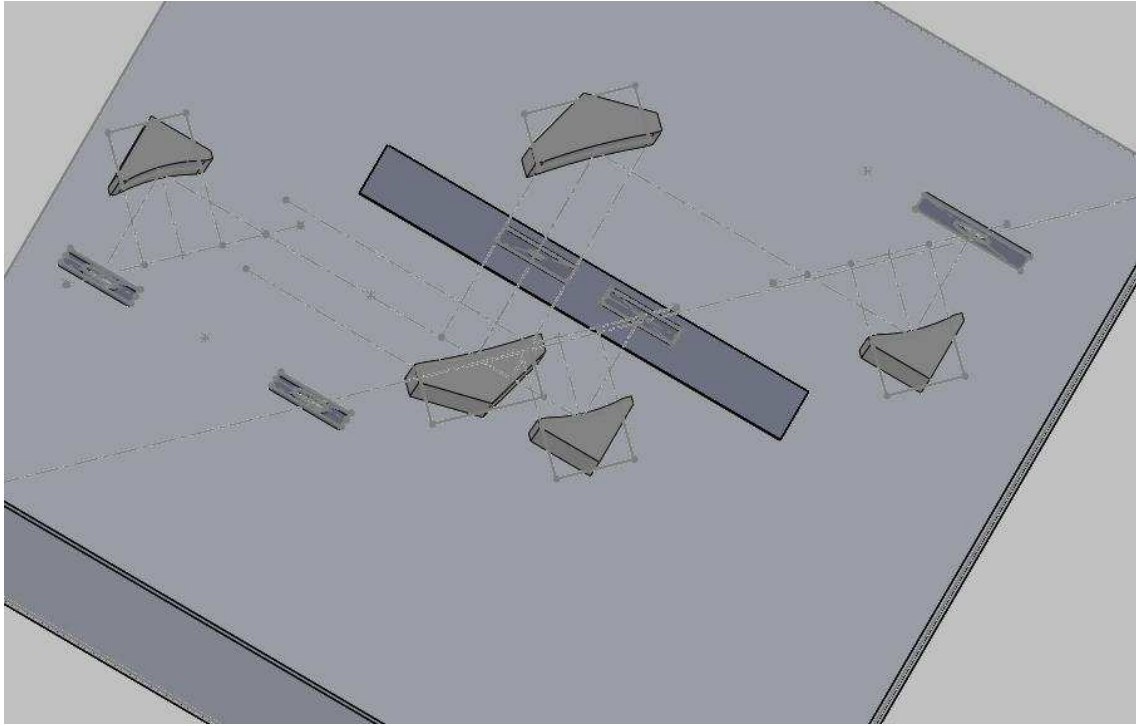


Figura 8.25: Montaje 2 espejos elíptico y 2 parabólicos

Este último montaje es el realizado para el sistema de dos espejos elípticos y otros dos parabólicos. En él se observan los dos espejos elípticos que se utilizarán para el funcionamiento de este sistema y los otros dos parabólicos. Pero, a parte, se observa también un espejo elíptico que es otro de los elementos fijos. Este espejo elíptico no interviene en el funcionamiento por tanto, como ya ocurría en el sistema anterior, se puede mantener colocado en el soporte a pesar de no ser utilizado.

En este caso el soporte de medida que se va a utilizar es el de diámetro mayor ya que los espejos parabólicos hacen que el haz no se enfoque y por tanto el valor de $\omega_{0\ out}$ sea mayor.

Para los montajes tanto del diseño 1 como del diseño 2 se ha pensado dos tipos de medida. Se podrán medir las muestras tanto en horizontal o en vertical según se apoye sobre una pared u otra como se ha explicado anteriormente. Dependiendo del tipo de muestra que se desee medir será más fácil una configuración u otra. También habrá que tener en cuenta que al cambiar la forma de medida la forma en la que sujetarán las antenas tanto emisora como receptora cambiará.

10- CONCLUSIONES

Una vez hecho todo el análisis teórico y vistos los resultados quedaría comentar las conclusiones obtenidas de todo esto.

En primer lugar es necesario tener presentes los motivos que llevaron a la realización de este proyecto. Debido a que no era posible medir pequeñas secciones de diferentes materiales en espacio libre a altas frecuencias se pensó en realizar un sistema cuasi-óptico para conseguirlo. Por ello el primer diseño del que trata este proyecto es un sistema de cuatro espejos elípticos, que como se ha ido analizando durante todo este proyecto, cumple con las especificaciones. Posteriormente se pensó en aprovechar dicho diseño e incluir algunos cambios en él con la idea de que se pudiese utilizar también para medir secciones más amplias de dichos materiales. Por ello, se diseñó el sistema que combinaba dos espejos elípticos con otros dos parabólicos.

Como se ha podido ver en los distintos apartados de este proyecto se han ido analizando distintos tipos de opciones hasta conseguir las medidas adecuadas para no perder apenas potencia durante el trayecto de la energía a través del sistema, y que el spill-over que se tenía fuera bajo. Con el fin de conseguir esto se llegó, en el apartado de diseño, a unas medidas para cada espejo de $x=0.10$ e $y=0.07$ metros y una distancia focal de 0.15 metros. Con estas medidas se evitaba que los espejos chocasen unos con otros. Una vez obtenidas las medidas solo quedaba ver si los resultados eran tan buenos como los esperados. Para calcular estos resultados se ha utilizado el software GRASP, calculando distintos cortes de energía tanto en el punto donde se medirán las futuras muestras como al final del sistema.

Los resultados obtenidos de este proyecto han sido muy satisfactorios. Además es importante decir que se han calculado para dos tipos de antenas. En primer lugar se hizo un cálculo de ambos sistemas utilizando una antena ideal definida en GRASP con las características de una antena Gaussiana. En segundo lugar, se realizaron los mismos cálculos pero esta vez para una antena definida a partir de las características de una antena real del laboratorio se usarán como entrada los campos radiados por esta antena. Los resultados para ambos sistemas y para cualquiera de las dos antenas eran superiores al 74 % de potencia al final del sistema e incluso llegaban a ser superiores al 90% para algunos casos.

Los resultados obtenidos para ambos tipos de antenas eran buenos, ya que para ambos el spill-over tenía valores máximos de 1.3 dB y en la mayoría era muy bajo, inferior a 0.2 dB en prácticamente todos los casos, y en algunos incluso despreciable. Por lo que, los valores obtenidos en el apartado de diseño para los espejos y la geometría del sistema eran los adecuados.

Las imágenes obtenidas de los cortes realizados en ambos sistemas mostraban datos muy buenos. Ya que para el sistema de cuatro espejos elípticos se obtenían imágenes que iban mostrando como el haz viajaba por el sistema y focalizaba en los puntos indicados. También se obtenían valores muy reducidos para $\omega_{0\ out}$ inferiores a 6.5 milímetros. Dichos resultados eran



en muchos de los casos menores que los calculados teóricamente o en su defecto eran muy similares.

Para el diseño de cuatro espejos combinando dos elípticos y dos parabólicos los resultados eran similares con la puntualidad de que para este sistema ya no se apreciaba una focalización como en el caso anterior. Esto es debido a que ahora se utilizaban también espejos parabólicos que no tenían esta característica. El valor de $\omega_{0\ out}$ era mucho mayor en el punto de medida. Los valores que se obtenía para $\omega_{0\ out}$ en el punto de medida eran del orden de 0.08 m.

Teniendo ya los dos sistemas analizados y comprobando que los resultados eran los esperados se procedió a pensar el montaje que se iba a realizar. Ambos diseños constaban de 4 espejos cada uno pero con la intención de reducir el coste se intentó simplificar el diseño lo máximo posible y construir solo los objetos necesarios. Por ello se combinaron ambos diseños en uno y se evitó así la construcción de dos espejos elípticos.

También hay que recordar que a la hora de diseñar el montaje que han diseñado dos configuraciones distintas que permiten medir las muestras en sentido horizontal y en sentido vertical. Esto es gracias a que se ha construido un soporte para todo el sistema con tres paredes. En una de ellas se colocará el sistema total con todos los espejos y soportes, y las otras dos paredes serán sobre las que se apoye el sistema dependiendo de si se desea una configuración u otra. Con ello se da la posibilidad de medir muestras en ambos sentidos lo que puede ser de gran ayuda en el futuro.



11-LÍNEAS FUTURAS

Como líneas futuras de este proyecto estaría la construcción y medida del sistema cuasi-óptico.

La construcción se llevará a cabo por una empresa especializada en este tipo de diseños.

Una vez que se tenga el sistema construido faltaría calcular los valores teniendo el montaje construido y comprobar si los resultados obtenidos prácticamente se corresponden con los calculados teóricamente y los obtenidos de forma simulada gracias a GRASP.

Esto se realizará fuera de lo que engloba el presente proyecto.





12-BIBLIOGRAFÍA

- [BEL96] Augusto Beléndez Vazquez, “Fundamentos de óptica para ingeniería informática”, Universidad de Alicante, 1996.
- [BEN69] F.A. Benson, “Attenuation of rectangular waveguides.” Chapter 14 in Millimetre and Submillimetre Waves, F.A. Benson, Ed. London: Iliffe Press, 1969.
- [BIR94] J. Birch et al., “An intercomparison of measurement techniques for the determination of the dielectric properties of solids at near millimeter wavelengths”. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-42, pp. 956-965, June 1994.
- [CAS94] J. Casas, “Óptica.” Librería General, Zaragoza, 1994.
- [GOL86] P.F. Goldsmith, “Gaussian beam transformation with cylindrical lenses.” IEEE Tans. Antennas Propag., vol. AP-34, pp. 603-607, April 1986.
- [GOL98] P.F. Goldsmith, “Quasioptical Systems.” Ed. IEEE Press, 1998.
- [GUE90] R.D. Guenther, Chapter 5 in Modern Optics, pp. 138-144. New York: Wiley, 1990.
- [HEC86] Eugene Hecht/ Alfred Zajac “OPTICA.” Ed. Addison Wesley Iberoamericana, 1986
- [KOG65] H. Kogelnik, “Imaging of optical modes-Resonators with internal lenses.” Bell Syst. Tech. J., vol. 44, pp. 455-494, March 1965.
- [LYN88] W.B. Lynch, K.A. Earle, and J.H. Freed, “1-mm wave ERS spectrometer.” Rev. Sci. Instrum., vol. 59, pp. 1345-1351, August 1988.
- [SIM84] G.J. Simonis, J.P. Sattler, T.L. Worchesky, and R.P. Leavitt, “Characterization of near-millimeter wave materials by means of non-dispersive Fourier transform spectroscopy.” Int. J. Infrared Waves, vol. 5, pp. 57-72, January 1984.